



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

TESE DE DOUTORADO

**OTIMIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE REAPROVEITAMENTO DE
RESÍDUO DE QUARTZO NA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA**

GERSON FERREIRA DA SILVA

Porto Alegre/RS
2023

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGE3M

**OTIMIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE REAPROVEITAMENTO DE
RESÍDUO DE QUARTZO NA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA**

GERSON FERREIRA DA SILVA
Engenheiro de Minas

Tese defendida junto ao Programa de Pós-Graduação em engenharia de Minas, Materiais e Metalúrgica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para obtenção de título de Doutor em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Irineu Antônio Schadach De Brum

Porto Alegre/RS
2023

GERSON FERREIRA DA SILVA

**OTIMIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE REAPROVEITAMENTO DE
RESÍDUO DE QUARTZO NA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, na área de Tecnologia Mineral e Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Irineu Antônio Schadach de Brum. Orientador

Profa. Dra. Adriana Lemos Porto. IFPB

Prof. Dr. Jonatas Franco da Mata. UFRVJM

Prof. Dr. André Camargo de Azevedo. UFRGS

Porto Alegre/RS

2023

Dedico aos meus pais, a minha esposa e as minhas
filhas, amores da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço a todas as pessoas e instituições que contribuíram direto e indiretamente na realização desta pesquisa.

Só grato imensamente a Deus, por toda sabedoria, orientação e discernimento durante a realização desse trabalho.

A toda minha família, em especial aos meus pais, José Lopes da Silva e Maria Ferreira da Silva que sempre me incentivaram a estudar.

A minha querida esposa, Kivânia Ferreira por toda dedicação e apoio nos momentos difíceis, e por mais uma grande conquista em nossas vidas.

A minha filha Gabriela, que em seu silêncio e olhar me transmite amor, carinho e felicidade, dando-me disposição e confiança para superar as adversidades da vida.

A minha princesa Beatriz, com sua alegria, sorriso e beijos, tornando nossas vidas afortunadas.

Ao meu orientador Prof. Dr. Irineu Antônio Schadach de Brum por sua dedicação, orientação, e o aceite pela oportunidade de trabalharmos juntos na realização desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, através do LAPROM pela oportunidade e disponibilização da estrutura para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao laboratório de Tratamento de Minérios da UFCG, Campus Campina Grande-PB, em especial ao professor Dr. Elbert.

Ao laboratório de Tratamento de Minérios da UFPE, do Curso de Engenharia de Minas pelo espaço cedido para realização de parte dos ensaios desta pesquisa, em especial ao professor Pedro Guzzo.

À CAPES e CNPQ pelo apoio financeiro para realização da pesquisa.

A Mineração Florentino Ltda do município de Pedra Lavrada/PB pelas informações fornecidas do processo de beneficiamento dos pegmatitos.

Aos amigos e Engenheiros de Minas, Vinícius Rewel e Defsson Douglas e ao Téc. Mineração Vinícius pelo apoio na realização dos ensaios desta pesquisa.

RESUMO

Em uma usina de beneficiamento, tem-se que cerca de 30% a 50% do consumo energético está associado à cominuição. O sistema de moagem pesquisado é um circuito fechado normal, composto por um moinho de seixos, no qual o material da descarga deste equipamento segue para um classificador pneumático. Devido à falta de orientação técnica o processo de cominuição apresenta um elevado consumo de energia na unidade de beneficiamento. Neste caso, a busca pela otimização do processo de moagem permite melhorar a eficiência dos equipamentos e conseqüentemente reduzir o consumo energético. Com o propósito de reduzir o impacto ambiental e inserir as recentes novidades tecnológicas no processo de moagem de quartzo no estado da Paraíba, o trabalho foi desenvolvido utilizando o resíduo da extração do quartzo do pegmatito Alto Dois Irmãos e também aplicando o software Usim Pac. A pesquisa tem como principal objetivo o reaproveitamento do resíduo de quartzo do pegmatito Alto dois Irmãos, propor uma otimização para o processo de moagem e estabelecer uma metodologia para a instalação e funcionamento de uma nova unidade de beneficiamento de quartzo no Estado da Paraíba. A realização da pesquisa possibilitou direcionar o resíduo de quartzo, para as indústrias bélica, de construção civil e elétrica, contribuindo de forma significativa para amenizar o impacto ambiental. Outra questão importante, foram os ensaios de moagem e simulação que permitiram tornar o processo de beneficiamento eficiente. Na realização dos dois primeiros ensaios de moagem do resíduo em laboratório foram utilizados os seguintes dados: alimentação do moinho com partículas $\leq 5,0$ mm, velocidade de operação de 70 rpm, e carga de enchimento de 35% e 40%. Para os dois últimos ensaios foram usados: alimentação do moinho com partículas $\leq 5,0$ mm, velocidade de operação de 100 rpm, e carga de enchimento de 35% e 40%. O segundo ensaio de moagem que apresenta carga de enchimento de 40%, apresentou cerca de 48% de material passante em 0,147 mm, que é faixa granulométrica de interesse desta pesquisa. Esse resultado é importante, pois permite melhorar a eficiência do processo em escala industrial. A simulação do processo da moagem do resíduo foi realizada com base nos dados coletados do moinho de seixos da unidade de beneficiamento, nas informações dos ensaios de moagem em laboratório e no modelo calibrado. Os ensaios da simulação do processo apresentaram vários cenários. E neste caso, o cenário I apresentou um percentual de material passante em 0,147 mm de 52,18%, e o cenário II apresentou 57,99% de material passante em 0,147 mm. Esses resultados possibilitam otimizar o processo de moagem e também fornecer parâmetros ótimos para a instalação de um novo equipamento de moagem. De maneira geral, os trabalhos realizados foram satisfatórios, pois o resíduo analisado apresentou teor de SiO₂ elevado, podendo ser reaproveitado para diversos seguimentos da indústria. Esse reaproveitamento é fundamental para diminuir os impactos ambientais causados na região de exploração e de beneficiamento. A partir das informações de campo, laboratório e da simulação, foi possível determinar uma metodologia para realizar a otimização da moagem atual e principalmente definir parâmetros confiáveis para a instalação e funcionamento de uma nova unidade de beneficiamento de quartzo.

ABSTRACT

In a beneficiation plant, up from 30% to 50% of energy consumption is associated to comminution. The researched milling system is a normal closed circuit, composed by a pebble mill, in which the discharge material follows to a pneumatic classifier. Due to the lack of technical guidance, the comminution process presents a high energy consumption in the beneficiation unit. In this case, the search for the optimization in of the milling process allows to improve the efficacy of the equipment and consequently to reduce the energy consumption. With the purpose of reducing the environmental impact and insert the recent technology news in quartz milling process in the state of Paraíba, the work was developed using the residue of the pegmatitic quartz extraction Alto Dois Irmãos and also applying the software Usim Pac. The research has as mainly objective the reuse of the quartz residue of Pegmatite Alto Dois Irmãos, to suggest an optimization to the milling process and to establish a methodology to the installation and operation of a new quartz beneficiation unity in Paraíba State. The research done allowed the targeting of quartz residue to arms, civil and electrical industry contributing in a significant way to soften the environmental impact. Another important question, was the milling and simulation tests, that allowed to turn the beneficiation process efficient. In carrying out of the first two residue milling tests in laboratory, were used the following data: Mill feed with particles $\leq 5,0$ mm, operation speed of 70 rpm, and filling load of 35% and 40%. For the last two tests, were used: Mill feed with particles $\leq 5,0$ mm, operation speed of 100 rpm and filling load of 40% and 40%. The second milling test, that presents the filling load of 40%, presented about 48 of material through material in 0,147 mm, that is the granulometric range of interest for this research. This result is important, because it allows to improve the process efficiency in industrial scale. The simulation of the milling process of the residue was done based on the collected data of the pebble mill of the beneficiation unity, in the milling test information in laboratory and in the calibrated model. The tests simulation process presented several scenarios. In this case, the scenario I presented a percentage of through material in 0,147 mm of 52,18%, and the scenario II presented 57,99% of through material in 0,147 mm. These results made possible to optimize the milling process and also to provide great parameters to the installation of a new milling equipment. In general, the works performed were satisfactory, given that the analyzed residue, presented high content of SiO₂, being able to be reused to several segments in industry. This reuse is fundamental to reduce the environmental impacts caused in the exploration and beneficiation region. From these field, laboratory and simulation information, was possible to determine a methodology to perform the optimization of the current milling and above all to define trustworthy parameters to the installation and operation of a new unity of quartz beneficiation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Resíduo da lavra no pegmatito Alto Dois Irmãos.....	2
Figura 2 - Material considerado estéril na lavra do garimpo.....	3
Figura 3 - Mapa de localização da Província Pegmatítica da Borborema com Pegmatitos em destaque	10
Figura 4 - Estrutura interna de pegmatitos heterogêneos	11
Figura 5 - Cristal de quartzo leitoso do garimpo Alto dois Irmãos	16
Figura 6 - Vista do pegmatito Alto Dois Irmãos	20
Figura 7 - Britador de mandíbulas primário da Mineração Florentino.....	21
Figura 8 - Britador de mandíbulas secundário da Mineração Florentino	22
Figura 9 - Moinho de Seixos da Mineração Florentino.....	22
Figura 10 - Mecanismo de fragmentação	24
Figura 11 - Moinho tubulares ou de carga cadente	26
Figura 12 - Moinho de bolas	27
Figura 13 – (a) Bica de entrada (b) Alimentador tambor	28
Figura 14 – (a) Overflow/transbordamento (b) Diafragma	29
Figura 15 – Fixação de revestimento metálicos	30
Figura 16 – Acionamento do moinho por coroa e pinhão	31
Figura 17 – Acionamento Gearless	32
Figura 18 - Regime catarata	33
Figura 19 – Regime de cascata	33
Figura 20 – Trajetória circular e parabólica do meio moedor	34
Figura 21 – Circuito fechado normal.....	36
Figura 22 – Circuito fechado reverso	36
Figura 23 – Fundamentos da simulação estática	48
Figura 24 - Principais funcionalidades de um simulador de estado estacionário.....	57
Figura 25 – Modelos de operações unitárias	59
Figura 26 – Metodologia para alcançar um design preliminar	60
Figura 27 – Fluxograma dos ensaios realizados	62
Figura 28 – Unidades de Beneficiamento Mineração Florentino Ltda	64
Figura 29 – Pontos de coleta de material no beneficiamento de pegmatitos da Mineração Florentino Ltda	66
Figura 30 - Pilha de homogeneização.....	68
Figura 31 – Coleta de amostra por cone de amostragem.....	68
Figura 32 – Quarteador Jones.....	69
Figura 33 – Picnômetro a gás modelo Accupyc 1340.....	70
Figura 34 – Representação do moinho de bolas usado no ensaio de WI.....	72
Figura 35 – Britagem do material no laboratório de tratamentos de minérios da UFCG.....	76
Figura 36 – Moinho de bolas de alumina em escala laboratorial	77
Figura 37 – Peneiras sob o rotap	80
Figura 38 – Fluxograma do circuito de moagem da Mineração Florentino	80
Figura 39 – Curva granulométrica do moinho em escala industrial.....	92

Figura 40 – Difratoograma das amostras A, D e F	94
Figura 41 - Amostra A	95
Figura 42 – Amostra D	95
Figura 43 – Amostra F	95
Figura 44 – Curva granulométrica do material britado – 5,0 mm	99
Figura 45 - Porcentagem do passante (0,147 mm) em função do tempo de moagem	102
Figura 46 - Porcentagem do passante (0,147 mm) em função do tempo de moagem	104
Figura 47 – Porcentagem do passante (0,147 mm) em função do tempo de moagem	108
Figura 48 - Porcentagem do passante (0,147 mm) em função do tempo de moagem	111
Figura 49 - Material passante em cada faixa granulométrica em tempo de 60 min	111
Figura 50 – Corpos moedores utilizados no moinho de seixos	118
Figura 51 – Peneira inclinada de dois deques usada após a britagem secundária	120
Figura 52 - Fluxograma da simulação realizada no USIM PAC do processo de moagem da Mineração Florentino	121
Figura 53 – Características físicas do material	122
Figura 54 – Classes granulométricas	122
Figura 55 – Valores do retido da análise granulométrica da alimentação do moinho	123
Figura 56 – Modelo matemático usado na simulação	124
Figura 57 – Fluxograma do Cenário I	125
Figura 58 – Resultado da distribuição granulométrica do Cenário I	125
Figura 59 - Curva de distribuição granulométrica produzida na simulação	126
Figura 60 - Fluxograma do Cenário II	127
Figura 61 - Resultado da distribuição granulométrica do Cenário II	128
Figura 62 - Curva de distribuição granulométrica produzida na simulação	128
Figura 63 - Fluxograma do Cenário III	129
Figura 64 - Resultado da distribuição granulométrica do Cenário III	130
Figura 65 - Curva de distribuição granulométrica produzida na simulação	130
Figura 66 - Fluxograma do Cenário IV	131
Figura 67 - Resultado da distribuição granulométrica do Cenário IV	132
Figura 68 - Curva de distribuição granulométrica produzida na simulação	132
Figura 69 - Fluxograma do moinho ideal	133
Figura 70 - Resultado da distribuição granulométrica do Cenário V	134
Figura 71 - Curva de distribuição granulométrica produzida na simulação	134
Figura 72 - Cenários simulados e operação atual	135
Figura 73 - Peneira utilizada após a britagem secundária	137
Figura 74 – Equipamento de moagem pesquisado	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Rochas que apresentam o mineral de quartzo e suas utilizações	15
Tabela 2 - Especificações químicas do mineral quartzo para uso nas indústrias	17
Tabela 3 - Especificações das lascas de quartzo usadas na fabricação da sílica vítrea e SiGM.	18
Tabela 4 - Modelos teóricos para estimação da carga circulante	37
Tabela 5 - Principais benefícios mencionados pelas empresas	50
Tabela 6 - Resumo das etapas e ensaios realizados nesse trabalho	62
Tabela 7 - Distribuição granulométrica e ponderada da carga de bolas do moinho.....	72
Tabela 8 - Parâmetros empregados nos ensaios de moagem com 35% volume útil	77
Tabela 9 - Parâmetros empregados nos ensaios de moagem com 40% volume útil	78
Tabela 10 - Dados do circuito de moagem da Mineração Florentino	81
Tabela 11 - WI kwh/t curta médios de alguns minerais e minérios	82
Tabela 12 - Fator de ineficiência em circuito aberto	82
Tabela 13 - Fator de eficiência do diâmetro do moinho.....	82
Tabela 14 - Características de moinho de bolas	84
Tabela 15 - Valores de K para diversos tipos de moinho e tipos de moagem.....	85
Tabela 16 - Carga inicial de bolas (% peso).....	86
Tabela 17 - Parâmetros utilizados no modelo 116 – moinho de Bolas	88
Tabela 18 - Identificação e as massas das amostras primárias coletadas	89
Tabela 19 - Distribuição granulométrica do produto do britador primário – B	89
Tabela 20 - Distribuição granulométrica do produto do britador secundário – C.....	90
Tabela 21 - Distribuição granulométrica da alimentação do moinho de seixos – D.....	90
Tabela 22 – Distribuição granulométrica da saída do moinho de seixos	91
Tabela 23 - Distribuição granulométrica da alimentação do overflow – E.....	91
Tabela 24 - Distribuição granulométrica do produto após o hidrociclone – F.....	92
Tabela 25 - Composição química das amostras ROM (A), alimentação do moinho de seixos (D) e produto do moinho de seixos (F)	93
Tabela 26 - Densidade aparente.....	96
Tabela 27 - Classificação dos valores de Work Index (WI).....	97
Tabela 28 - Ensaio de Work Index (WI) do minério pesquisado	97
Tabela 29 - Distribuição granulométrica do material britado a – 5,0 mm.....	98
Tabela 30 - Distribuição granulométrica da moagem (5 min).....	99
Tabela 31 - Distribuição granulométrica da moagem (15 min).....	100
Tabela 32 - Distribuição granulométrica da moagem (30 min).....	100
Tabela 33 - Distribuição granulométrica da moagem (45 min).....	100
Tabela 34 - Distribuição granulométrica da moagem (60 min).....	101
Tabela 35 - Distribuição granulométrica da moagem (75 min).....	101
Tabela 36 - Distribuição granulométrica da moagem (5 min).....	102
Tabela 37 - Distribuição granulométrica da moagem (15 min).....	102
Tabela 38 - Distribuição granulométrica da moagem (30 min).....	103
Tabela 39 - Distribuição granulométrica da moagem (45 min).....	103

Tabela 40 - Distribuição granulométrica da moagem (60 min).....	104
Tabela 41 - Distribuição granulométrica da moagem (75 min).....	104
Tabela 42 – Distribuição granulométrica da moagem (5 min).....	105
Tabela 43 – Distribuição granulométrica da moagem (15 min).....	105
Tabela 44 – Distribuição granulométrica da moagem (30 min).....	106
Tabela 45 – Distribuição granulométrica da moagem (45 min).....	106
Tabela 46 – Distribuição granulométrica da moagem (60 min).....	106
Tabela 47 – Distribuição granulométrica da moagem (75 min).....	107
Tabela 48 – Distribuição granulométrica da moagem (5 min).....	108
Tabela 49 – Distribuição granulométrica da moagem (15 min).....	108
Tabela 50 – Distribuição granulométrica da moagem (30 min).....	109
Tabela 51 – Distribuição granulométrica da moagem (45 min).....	109
Tabela 52 – Distribuição granulométrica da moagem (60 min).....	109
Tabela 53 - Distribuição granulométrica da moagem (75 min).....	110
Tabela 54 - Dados operacionais coletados do moinho de seixos	112
Tabela 55 - Dados coletados referentes à moagem na Mineração Florentino.....	113
Tabela 56 - Características do moinho de seixos selecionado.....	115
Tabela 57 - Características atuais do moinho de seixos Mineração Florentino LTDA.....	116
Tabela 58 - Tamanho e porcentagens das bolas recomendadas para o moinho de seixos	117
Tabela 59 - Tamanho das bolas do moinho e a relação L/D	117
Tabela 60 - Especificações técnicas para peneira vibratória inclinada MS.....	119
Tabela 61 – Fatores de controle físico do moinho de bolas	120

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

"	Polegada
#	Mesh
%	Porcentagem
%V _c	Velocidade de operação do moinho
EF ₁	Fator que corrige o tipo de moagem
EF ₂	Fator que corrige o tipo de circuito
EF ₃	Fator que corrige o diâmetro do moinho
EF ₄	Fator que corrige a granulometria de alimentação com tamanho excessivo
EF ₅	Fator que corrige a energia adicional para moagens extremamente finas
EF ₇	Fator que corrige a relação de redução no moinho de bolas
<	Menor
>	Maior
µm	Micrômetro
∞	Infinito
ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
ANM	Agência nacional de mineração
Apex	Abertura na parte inferior do hidrociclone pela qual descarrega partículas.
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
Cm	Centímetro
cm ³ /g	Centímetro cúbico por gramas
COMIPEL	Cooperativa dos Mineradores de Pedra Lavrada-PB
D	diâmetro interno ao revestimento da carcaça do moinho
d _{bola}	Diâmetro máximo das bolas
DEM	Método dos Elementos Discretos
DRX	Difratometria de Raios X
d _s	Densidade dos sólidos
DWT	Drop Weight Test
E	Energia necessária para moagem de uma ton curta de material
E _{cs}	Energia específica de cominuição
EF ₆	Fator que corrige a relação de redução no moinho de barras
E _i	Energia utilizada para quebra
E _{is}	Energia específica utilizada
F	Granulometria da alimentação no qual 80% passa numa determinada peneira de referência
F ₈₀	Abertura da peneira pela qual passam 80% da massa da alimentação
FRX	Fluorescência de raios X
g	gramas
gr	Constante gravitacional
h _F	Altura final do peso acima da bigorna
h _I	Altura inicial do peso acima da bigorna
HP	Horse - power

Hz	Hertz
JKMRC	Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre
K	fator que depende do tipo de moagem
Kg	Kilo grama.
Km ²	Quilômetro qadrado
Kv	Kilo volts
Kwh	Kilo Whats hora
Kwh/t	kilo whats hora por tonelada
Ltda	Limitada ou sociedade limitada
M	Massa do peso
<i>M</i>	Massa média da partícula
M	metros
mA	Mile ampere
MBP	Modelo de Balanço Populacional
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Min	Mínutos
ml	Mililitro
mm	Milímetro
Mob	Média dos três últimos valores de moabilidade no estado de equilíbrio
NBR	Normas brasileiras
P ₀	Granulometria do produto no qual 80% passam numa determinada peneira de referência
P ₈₀	Abertura da peneira pela qual passam 80% da massa do produto
PB	Paraíba
PLCs	Controladores lógicos programáveis
PPB	Província Pegmatítica da Borborema
psig/min	Libras por polegadas quadrada por minutos
RN	Rio Grande do Norte
ROM	Run Of Mine
rpm	Rotação por minutos
S	Sul
SiGM	Silício de grau metalúrgico.
SiO ₂	Sílica
t ₁₀	Porcentagem acumulada passante em 1/10 da malha geométrica Y da fração do teste
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande - PB
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
US\$	Dolar americano
W	Oeste
WI	Índice de trabalho
XIX	Décimo nono
XX	Vigésimo
ρ	Massa específica do minério

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 RELEVÂNCIA.....	4
1.2 JUSTIFICATIVA	5
1.3 OBJETIVOS.....	7
1.3.1 Objetivo Geral	7
1.3.2 Objetivos Específicos	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 PEGMATITOS.....	8
2.2 PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA (PPB)	9
2.3 QUARTZO	13
2.3.1 Propriedades	13
2.3.2 Ambiente de formação e formas de ocorrência	14
2.3.3 Variedades do quartzo	15
2.3.3.1 Variedade cristalina	15
2.3.3.2 Quartzo leitoso.....	16
2.3.4 Usos e especificações da variedade cristalina do quartzo	16
2.3.5 Lavra e beneficiamento de quartzo	18
2.4 COMINUIÇÃO	22
2.4.1 Moagem	24
2.5 MODELOS EMPREGADOS NA COMINUIÇÃO	38
2.5.1 Modelos empíricos	38
2.5.2 Modelo fenomenológico	41
2.5.3 Modelo mecanicista	43
2.6 SIMULAÇÃO DE PROCESSOS.....	44
2.6.1 Definições sobre simulação computacional	45
2.6.2 Simulação estática	48
2.6.3 Simulação dinâmica	49
2.6.4 Simulação computacional	50
2.6.5 Formas para conduzir a simulação computacional	52
2.6.6 Utilização da simulação na mineração	53
2.6.7 Simulação em tratamento de minérios	56

2.6.8 Software Usim Pac 3.2.....	57
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	62
3.1 COLETA E PREPARAÇÃO DE AMOSTRA.....	64
3.2 ENSAIOS FÍSICOS	69
3.2.1 Densidade relativa do minério.....	70
3.2.2 Análise granulométrica	70
3.2.3 Determinação do índice de trabalho (WI).....	71
3.3 CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO	74
3.3.1 Difração de raios X (DRX).....	75
3.3.2 Fluorescência de raios X (FRX)	75
3.4 ENSAIOS DE BENEFICIAMENTO	75
3.4.1 Britagem	75
3.4.2 Ensaios de moagem.....	76
3.4.3 Ensaio granulométrico (P₈₀)	79
3.5 OTIMIZAÇÃO DO MOINHO DE SEIXOS	80
3.5.1 Determinação da energia para moagem.....	81
3.5.2 Tamanho dos corpos moedores	84
3.6 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE MOAGEM DO QUARTZO PEGMATÍTICO.....	86
3.6.1 Calibração de modelos	87
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	89
4.1 AMOSTRAGEM.....	89
4.1.1 Análise granulométrica	89
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO	93
4.2.1 Análise química.....	93
4.2.2 Difração de raios-X.....	94
4.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	94
4.2.4 Densidade	96
4.2.5 Determinação do Índice de Trabalho (<i>Work Index - WI</i>).....	97
4.3 ENSAIOS DE BENEFICIAMENTO	98
4.3.1 Ensaios de britagem.....	98
4.3.2 Ensaios de moagem.....	99
4.4 PROCESSO DE MOAGEM NA MINERAÇÃO ANTÔNIO FLORENTINO LTDA ...	112
4.4.1 Dimensionamento do moinho de seixos	113

4.4.2 Tamanho máximo dos corpos moedores	116
4.4.3 Peneiramento	118
4.5 CALIBRAÇÃO DO MODELO PARA A MOAGEM	120
4.6 SIMULAÇÃO	121
4.6.1 Cenário I	124
4.6.2 Cenário II	127
4.6.3 Cenário III	129
4.6.4 Cenário IV	131
4.6.5 Cenário do moinho redimensionado	133
4.7 PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO DO MOINHO DE SEIXOS	136
4.8 PARÂMETROS ÓTIMOS PARA O PROCESSO DE MOAGEM DE PEGMATITOS	139
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	140
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	143
REFERÊNCIAS	144

1. INTRODUÇÃO

A Província Pegmatítica da Borborema (PPB) é uma região de domínio de pegmatitos, abrangendo parte dos Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, com presença de corpos mineralizados, principalmente em Ta – Nb, Be, Sn e Li. Outras áreas pegmatíticas também ocorrem no Estado do Ceará. A mineração de pegmatitos na Mesorregião do Seridó teve início na década de 1940, a partir de incentivos que se originaram da cooperação do governo brasileiro com as Forças Aliadas durante a Segunda Guerra Mundial. Na ocasião, foi incentivada principalmente a produção de minerais de estanho, de berílio, de lítio e de tântalo. Com o fim do conflito, houve uma queda de produção, mas formou-se na região uma cultura mineira que persiste até os nossos dias (LUZ *et al.*, 2003).

As atividades de extração em pegmatitos ocorrem em regiões áridas, como a Mesorregião Central Potiguar e a Microrregião Seridó Oriental Paraibano, ambas inseridas na Província Pegmatítica Borborema – BPP (Luz *et al.*, 2003). Os pegmatitos mineralizados (minerais metálicos, minerais industriais e minerais-gemas) desta província concentram-se preferencialmente nos municípios de Parelhas, Equador e Carnaúba dos Dantas, no Estado do Rio Grande do Norte, e nos municípios paraibanos de Picuí, Pedra Lavrada, Nova Palmeira, Frei Martinho, Juazeirinho e Junco do Seridó (IDEMA, 2010). Pela quantidade de corpos mineralizados e variedades de minerais raros, esta província é considerada a segunda maior província pegmatítica do Brasil (CASTRO; JATOBÁ, 2006).

Nesta província, existem várias empresas que trabalham com extração e beneficiamento de minérios de pegmatitos. E, no caso do município de Pedra de Lavrada – PB, estão instaladas as seguintes empresas: Mineração Florentino Ltda, Elizabeth Produtos Cerâmicos Ltda. e a COOMIPEL (Cooperativa de Pequenos Mineradores de Pedra Lavrada). As empresas citadas apresentam, em sua unidade de beneficiamento, um processo de moagem semelhante, por meio de um equipamento denominado moinho de seixos.

Os pegmatitos da região da Província Pegmatítica da Borborema são constituídos geralmente por minerais de quartzo, feldspato e mica, geralmente em menor quantidade, albita, biotita, turmalina negra e granada (CASTRO; JATOBÁ, 2006). Esses pegmatitos apresentam vasta mineralogia acessória e são explorados por garimpeiros e empresas de beneficiamento de pequeno a médio porte.

Para a utilização do mineral de quartzo na indústria, é necessário atender às especificações físicas e químicas, em que os cristais de melhor qualidade são empregados na indústria óptica

e eletrônica e os de menor qualidade, na indústria de abrasivos, cerâmica, metalúrgica e outros (CONSTANTINE, 1985; NOGUEIRA, 1988).

Esta pesquisa apresenta como atividade inicial identificar e quantificar os minerais presentes no resíduo (Figura 1) de quartzo do pegmatito Alto Dois Irmãos, visando o seu reaproveitamento. Esse resíduo é o acúmulo de material estéril (Figura 2) proveniente das operações de lavra que ocorre no veio do corpo pegmatítico. Em seguida realizar uma análise geral do processo de cominuição da Unidade de Beneficiamento Mineração Florentino Ltda, situada no município de Pedra Lavrada – PB, dando ênfase à etapa de moagem, para buscar tornar o processo de moagem otimizado. Para facilitar a compreensão e entendimento do resíduo empregado nas etapas de britagem e moagem, foram realizados alguns ensaios tecnológicos.

Figura 1 - Resíduo da lavra no pegmatito Alto Dois Irmãos



Fonte: Autoria própria

Em seguida, foram feitos os ensaios de moagem em laboratório e as informações obtidas foram empregadas em uma tecnologia de simulação de processos. Esse tipo de tecnologia, como o software Usim Pac, vem ajudando, de maneira eficiente, a minimizar os custos operacionais e de investimento, fornecendo uma estrutura formal, qualitativa e quantitativa para entendimento dos processos de beneficiamento. Também serve de base de dados para determinação de parâmetros ótimos de processo (MARTINS, 1997).

Figura 2 - Material considerado estéril na lavra do garimpo



Fonte: Autoria própria

A busca por uma rota de processamento otimizada para o beneficiamento desses pegmatitos, no qual os equipamentos funcionem de forma eficiente e em que seja utilizada a simulação de processos, poderá fornecer unidades de beneficiamento capazes de produzir menos resíduos que impactam o meio ambiente e aumentar a capacidade de produção. Esse modelo de aperfeiçoamento está associado à inserção das variáveis ou parâmetros ótimos, obtidos em ensaios de laboratório e coletados em estudos de campo.

Para consolidar o processo de otimização em um sistema de moagem ineficiente, a utilização da simulação de processos é considerado fundamental, pois permite melhorar o desempenho dos equipamentos e reduzir o consumo de energia. Neste caso, o software empregado serviu para fazer investigações sobre as possíveis modificações no fluxograma e principalmente definir as variáveis operacionais que tornam o processo de cominuição eficiente.

Assim, inserir os resultados desta pesquisa na operação de cominuição, especificamente na etapa de moagem, na qual é usado o moinho de seixos, poderá fornecer ganhos significativos no processo de beneficiamento dos pegmatitos e gerar emprego e renda à comunidade da região estudada.

1.1 RELEVÂNCIA

A relevância desta pesquisa está direcionada aos seguintes aspectos:

Aspecto Econômico:

De acordo com a Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre – JKMRRC (1995), o processo de cominuição em uma usina de beneficiamento apresenta um consumo de energia que varia entre 30% a 50% do total gasto no tratamento de minérios. Também é importante ressaltar que a soma desse consumo energético elevado, as despesas relativas à reposição dos corpos moedores desgastados durante o processo e outras variáveis, fazem com que a etapa de cominuição tenha um custo operacional em torno de 50% da planta de beneficiamento (WILLS, 2006). No caso da unidade de beneficiamento pesquisada, a empresa apresenta uma percentagem de consumo de energia bem maior, pois o beneficiamento dos pegmatitos são realizados pelas etapas de britagem, moagem e classificação.

Pelo fato de haver um alto custo no processo de cominuição, é fundamental a busca por um equilíbrio no funcionamento dos equipamentos de britagem e moagem, que constitui um circuito de cominuição. No estudo de caso em questão, foi necessária a realização do redimensionamento dos equipamentos que constituem o circuito de cominuição, principalmente do moinho de seixos que opera na moagem dos pegmatitos, na Província Pegmatítica da Borborema.

A otimização do processo de moagem visa tornar as unidades de beneficiamentos mais eficientes, consumindo menos energia, impactando menos o meio ambiente, e contribuindo de forma significativa na produção de minerais industriais, que abastecem o mercado da construção civil.

Aspecto Tecnológico:

A instalação e operação dos equipamentos de cominuição, tais como os britadores de mandíbulas e os moinhos de seixos, existentes nas empresas que atuam na região da Província Pegmatítica da Borborema não passaram por um estudo de processos e dimensionamento de projeto de engenharia, por meio de uma equipe composta por engenheiros de minas e outros profissionais técnicos. Nesse processo, o emprego de um modelo matemático no desenvolvimento do redimensionamento dos moinhos de seixos é fundamental para um projeto correto de instalação e funcionamento.

Os projetos direcionados à moagem de minerais industriais, especificamente na Província Pegmatítica da Borborema, demandam conhecimento técnico e tecnológico. Inicialmente se faz

necessária a correta definição da granulometria do material que alimenta os moinhos de seixos, que é fundamental para a eficiência do processo.

A região do município de Pedra Lavrada – PB tem apresentado uma produção significativa de minerais industriais nos últimos anos. Neste caso, o processo de cominuição, representado pelo equipamento de moinho de seixos, é extremamente importante para o bom andamento do processo, tornando-se fundamental a realização de pesquisas nesse campo, devido à carência de estudos específicos da moagem de pegmatitos.

A relevância tecnológica desta pesquisa apoia-se no desenvolvimento de estudos que permitem o aproveitamento de resíduos da lavra de pegmatitos mineralizados existentes na região da Província Pegmatítica de Borborema (PPB), bem como a determinação de parâmetros confiáveis para aplicação na simulação do processo de moagem. O prosseguimento dessa sistematização, a partir do uso da simulação mineral, permitirá: definir o correto dimensionamento dos equipamentos de moagem, avaliar o consumo energético, realizar um controle operacional eficiente e preencher uma lacuna dentro desse processo de cominuição.

Aspecto Ambiental:

As operações de lavra no pegmatito Alto Dois Irmãos ocasionam impactos ao meio ambiente, no que se refere as alterações paisagísticas e na geração de resíduos, proveniente da extração. O consumo de minerais industriais teve um crescimento significativo por parte da indústria de construção civil. Nesse caso, é fundamental a realização de trabalhos voltados ao reaproveitamento de resíduos da extração de minerais, pois os mesmos são considerados bens não renováveis. Assim, desenvolver essa pesquisa visando o reaproveitamento de resíduos da mineração é extremamente importante, pelo fato de possibilitar a diminuição de extração de minérios, e conseqüentemente aumentará a vida útil da mina, e principalmente pela capacidade de reduzir as pilhas de resíduos de quartzo situadas em torno do pegmatito Alto Dois Irmãos, que poluem o meio ambiente da região.

1.2 JUSTIFICATIVA

Na Província Pegmatítica da Borborema (PPB), existem várias unidades de beneficiamento de pegmatitos. Na Paraíba, essas unidades estão localizadas na região do município de Pedra Lavrada - PB, e operam no processo de cominuição de diversos minerais industriais, tais como: feldspato, quartzo, mica e caulim. No presente momento, o processo de cominuição é direcionado a esses minerais, porém a realização desta pesquisa possibilita o aproveitamento do material considerado estéril durante a extração de minérios no pegmatito

Alto Dois Irmãos-PB. O processo de cominuição é realizado por intermédio das etapas de britagem, moagem e classificação pneumática. A etapa de britagem é realizada por britadores de mandíbulas, a moagem ocorre por meio de moinhos de seixos, em que acontece a redução granulométrica do minério até o tamanho de 0,147 mm (malha 100), enquanto a classificação é feita por um ciclone.

A operação da moagem de quartzo e feldspato, que é realizada pelo moinho de seixos, atualmente apresenta uma baixa produtividade nas granulometrias de 0,147 mm (malha 100) e 0,074 mm (malha 200), e conseqüentemente um alto consumo energético. Os equipamentos que fazem parte do processo de cominuição dos pegmatitos foram instalados sem a devida orientação técnica e conhecimento científico. Essa metodologia empregada resultou em um baixo rendimento dos equipamentos, ocasionando uma subutilização.

Esse comportamento é resultado da falta de conhecimento sobre as leis da fragmentação que regem os princípios da cominuição e dos recursos tecnológicos, como o emprego dos softwares específicos para os processos de britagem e moagem. A falta de todo esse aparato de conhecimento contribui de forma significativa para uma baixa produção de granulados, uma geração elevada de resíduos e conseqüentemente um descarte incorreto desses resíduos na natureza.

A possibilidade de aproveitamento do material considerado resíduo na extração de minérios do pegmatito Alto Dois Irmãos – PB e no processo de moagem, juntamente com os dados de ensaios laboratoriais e principalmente o uso da simulação computacional, permitirá a determinação de uma nova metodologia de moagem dos minerais industriais (quartzo e feldspato). Essa melhoria no processo de moagem é imprescindível para diminuir os danos causados ao meio ambiente.

A partir das informações dos ensaios em laboratórios e da praticidade do uso dos softwares de simulação, é possível prever cenários que melhor representem a realidade operacional do processo de cominuição. Essa forma de planejar o processo irá contribuir para evitar as interrupções nos circuitos de cominuição, produzir um material de melhor qualidade e menos poluente ao meio ambiente, e melhorar a eficiência dos equipamentos de britagem e moagem.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar a possibilidade de aproveitamento do resíduo de quartzo do pegmatito Alto Dois Irmãos – PB, e direcioná-lo a indústria. Também entender a dinâmica do processo de moagem desse resíduo em um moinho de seixos e estabelecer uma metodologia para tornar o processo de moagem de resíduos de quartzo na Província Pegmatítica da Borborema – PPB otimizado.

Nesse caso, serão definidas as melhores condições operacionais para o processo de moagem, tais como: ensaios de moagem em laboratório e determinação das dimensões corretas para o moinho de seixos. Todos esses procedimentos são fundamentais para o emprego da simulação do processo, buscando identificar os problemas operacionais e surgir caminhos para a otimização do processo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- ✓ Detalhar as amostras de resíduo de quartzo proveniente do Garimpo Alto Dois Irmãos-PB e que foram coletadas na unidade de beneficiamento;
- ✓ Definir a possibilidade de utilização do resíduo para vários segmentos da indústria;
- ✓ Avaliar a faixa de distribuição granulométrica a partir de ensaios de moagem em laboratório, variando a carga de enchimento entre 35% e 40% e a velocidade de rotação entre 70 rpm e 100 rpm;
- ✓ Avaliar a percentagem de material passante em 0,147 mm e 0,074 mm (malha 100 e 200) na produção final de granulados, visando à diminuição do tempo de remoagem, em uma alimentação de tamanho ótimo do sistema de moagem;
- ✓ Verificar, a partir da simulação, os cenários que tornam o processo de moagem mais eficiente, aumentando a percentagem de material passante na malha 0,147 mm (malha 100) e reduzindo os custos operacionais;
- ✓ Propor recomendações para melhorar a eficiência do modelo do atual fluxograma do processo de moagem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PEGMATITOS

A designação pegmatito foi mencionada inicialmente pelo mineralogista francês Hauny no início do século XIX para designar o que se conhece atualmente por granito gráfico (JAHNS, 1955). Mas tarde, o vocábulo tornou-se mais abrangente, incluindo rochas de granulometria muito grosseira, onde o granito gráfico constitui uma parte delas.

No século XX vários pesquisadores desenvolveram teorias sobre a formação e evolução de pegmatitos, tais como (FERSMAN, 1931), (JOHNSTON Jr, 1945), (CAMERON *et al.*, 1949), (SOLODOV, 1962), (GINSBURG, 1979), e (CERNY, 1991).

Os pegmatitos são rochas ígneas, de granulometria variável, alcançando em alguns casos, grãos com tamanho, de centímetros até decímetros, e que a textura associada se chama pegmatítica. Esses corpos têm os mesmos constituintes minerais que o granito (quartzo, feldspato e mica), porém os tamanhos dos cristais são maiores. Apresentam composições variadas (dioríticas, gabroícas ou graníticas), sendo os pegmatitos graníticos os mais frequentes (JAHNS, 1955).

Os minerais oriundos desses pegmatitos, como feldspato, quartzo, mica, tantalita, berilo, e outros, quando há possibilidades de aproveitamento, são destinados ao mercado interno. Embora provenientes dos pegmatitos, cada bem mineral produzido tem propriedades diferentes e, conseqüentemente aplicações e mercados específicos, sendo utilizados na indústria cerâmica, e na construção, que são transformados em pisos, tintas, porcelanato, e louças sanitárias (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Os primeiros trabalhos sobre os pegmatitos da PPB se devem a Johnston Jr. (1945), que afirmou: “as rochas da região da PPB são, principalmente, gnaisses e micaxistos pré-cambrianos com intrusões de granitos cortados por pegmatitos e veios de quartzo”. Por serem rochas mais resistentes à erosão do que os xistos, os pegmatitos permanecem mais aparentes. Por isso são conhecidos como “altos”.

Classificação

São várias as classificações propostas para pegmatitos graníticos. Segundo Fersman (1931), eles estão divididos em:

- a) Pegmatitos de Linha Pura: São pegmatitos não contaminados pela rocha encaixante.
- b) Pegmatitos de Contato: São pegmatitos que contêm minerais indicativos de assimilação das rochas encaixantes.

c) Pegmatitos de Linha Cruzada: São pegmatitos de composição diferente dos pegmatitos de composição granítica devido a extensiva reação com as rochas encaixantes.

De acordo com Solodov (1962), utilizando critérios químicos e mineralógicos dividiu os pegmatitos graníticos em quatro tipos, baseado na predominância de alguns minerais formadores de rocha, estabelecendo seus elementos químicos característicos:

Tipo I – Pegmatitos a microclínio – K, Be.

Tipo II – Pegmatitos a albita – microclínio – K, Na, Ta, Be, Cs, Rb, Ti, Li.

Tipo III – Pegmatitos a albita – Na, Li, Be, Ta, Nb, Sn.

Tipo IV – Pegmatitos a albita – espodumênio – Na, Li, com esporádico Nb e Sn.

Segundo Cerny (1991), os pegmatitos são divididos em portadores de elementos raros, denominados em tipos e subtipos, a partir do predomínio de certos minerais e da assinatura geoquímica. Esta divisão está descrita a seguir:

Classe – Abissal; Elementos – U, Th, Zr, Nb; Mineralização – Pobre a moderada.

Classe – Moscovítico; Elementos – Li, Be, U, Nb >Ta; Mineralização – Pobre a moderada; Micas e minerais cerâmicos.

Classe – Elementos raros; Elementos – Li, Th, Zr, Nb; Mineralização – Pobre a abundante; minerais gemas e minerais industriais.

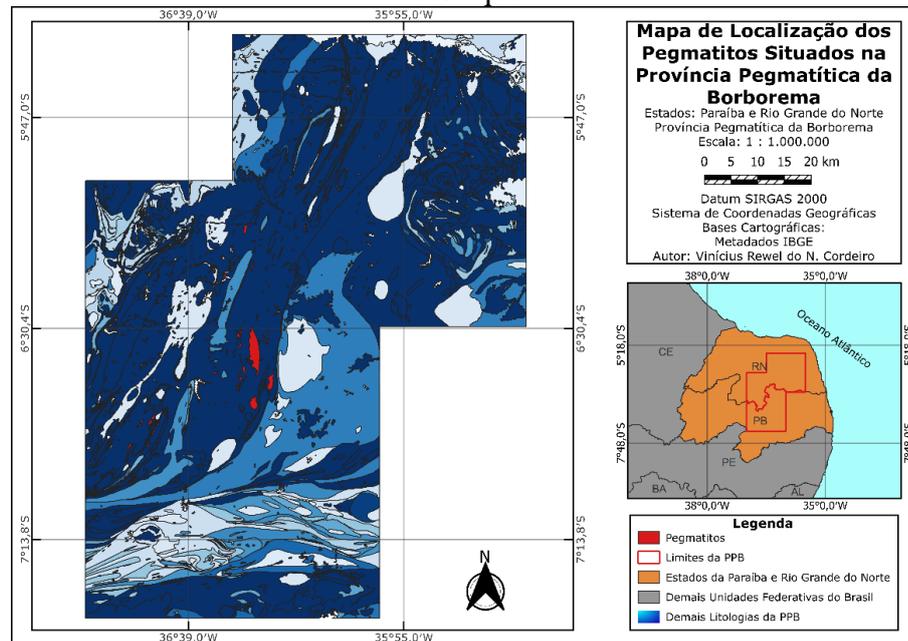
A classificação de Cerny (1991), atualmente é a mais utilizada de todas as classificações, pois engloba pressão, temperatura, ambiente metamórfico e relações dos pegmatitos com os granitos que os originaram.

2.2 PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA (PPB)

A Província Pegmatítica da Borborema (PPB) está inserida entre os Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba, tendo como coordenadas geográficas 5°30`S e 7°15`S de latitude e 35°45`W e 37°15`W de longitude, correspondendo a parte oriental da Faixa de Dobramento Seridó (Figura 3).

Conforme Da Silva (1995), a área aproximada de concentração dos pegmatitos da PPB é de 75 X 150 km², no Sudeste da Faixa de dobramentos Seridó, localizada entre os estados do RN e da PB, sendo estas rochas, majoritariamente, encaixadas em micaxistos, quartzitos e gnaisses do Grupo Seridó e, em número menor, nos gnaisses e migmatitos do Complexo Gnáissico – Migmatítico (LUZ; LINS, 2003).

Figura 3 - Mapa de localização da Província Pegmatítica da Borborema com Pegmatitos em destaque



Fonte: Autoria própria (2022)

Na Formação Seridó existem mais de 1.500 pegmatitos produtores de metais raros (Be, Ta – Nb, Li e Sn), de gemas e de minerais industriais (feldspato, caulim e quartzo), em uma área de ocorrência de cerca de 10.000 km² (SILVA; CROSTA, 2011).

Os pegmatitos mineralizados principalmente em Ta – Nb, Be, Sn, Li, minerais industriais e minerais gemas desta província, ocorrem nos municípios de Parelhas, Equador e Carnaúba dos Dantas, no Estado do Rio Grande do Norte, e nos municípios da Paraíba em Picuí, Frei Martinho, Nova Palmeira, Pedra Lavrada, Juazeirinho e Junco do Seridó.

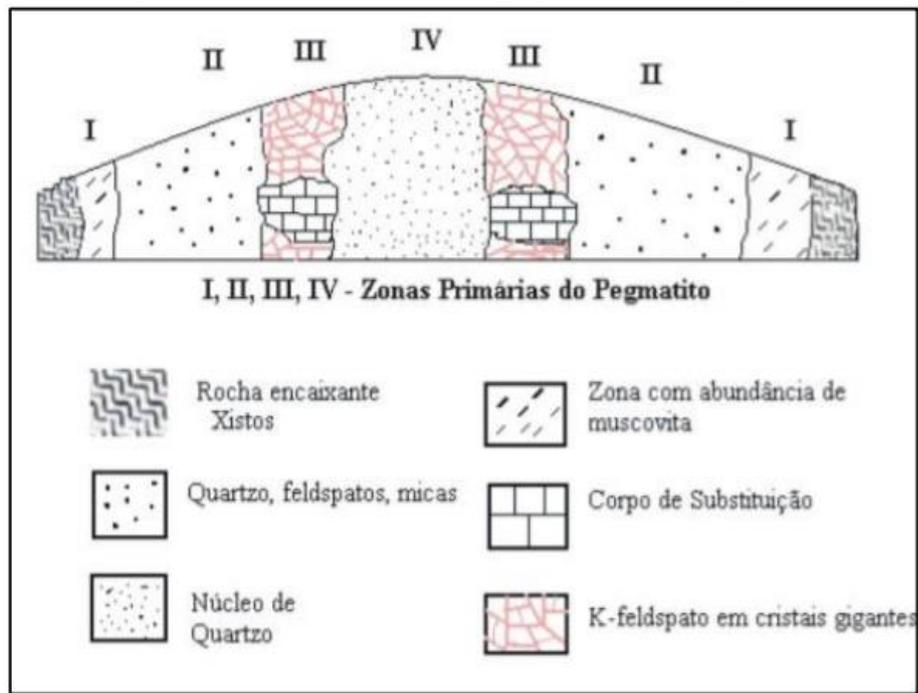
No período da II Guerra Mundial ocorreu um aumento no preço e na busca intensa por matérias primas e minerais estratégicos, como berilo e tantalita para atender as necessidades dos países aliados. De acordo com Rolff (1946), o município de Picuí na Paraíba chegou a produzir, neste período, 20% da produção mundial de tantalita, e 8 a 10% da produção mundial de berilo. Neste período foram lavradas simultaneamente cerca de 450 pegmatitos em toda região.

De acordo com Scorza (1944), Johnston Jr (1945), e Rolff (1945,1946), os pegmatitos da região foram classificados em função dos minerais de valor econômico (cassiterita, berilo, tantalita e columbita) em:

- a) Pegmatitos que contêm cassiterita.
- b) Pegmatitos que contêm minérios de cobre.
- c) Pegmatitos que não contêm cassiterita nem minerais de cobre.

O autor Johnston Jr (1945), classificou-os em homogêneos e heterogêneos, e propôs o modelo de estrutura interna dos pegmatitos heterogêneos composto pelas zonas I a IV como mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Estrutura interna de pegmatitos heterogêneos



Fonte: Adaptada de Johnston Jr. (1945)

Enquanto Rolff (1945) classificou-os em homogêneos, heterogêneos e mistos.

a) Pegmatitos homogêneos

- Constituídos principalmente por quartzo, feldspatos, e muscovita, biotita, schorlita e almandina.
- Às vezes podem conter um pouco de berilo, columbita – tantalita, e cassiterita.
- Suas dimensões variam entre 1,0 a 2,0 m de espessura, com extensão de até centenas de metros.
- São mais abundantes que os pegmatitos heterogêneos.

b) Pegmatitos heterogêneos

- Constituídos principalmente por quartzo, feldspatos e micas, podendo ter grandes quantidades de tantalatos, berilos, cassiterita e espodumênio, granada e turmalina negra.
- Podem conter grandes cristais (métricos) de berilo, feldspato, espodumênio, entre outros.
- Tem dimensões que chegam a 600,0 m de comprimento por 150,0 m de espessura, em afloramento.
- São economicamente mais importante que os pegmatitos homogêneos.

c) Pegmatitos mistos

- São Pegmatitos intermediários entre os homogêneos e os heterogêneos (ROLFF, 1945).
- São de granulação equidimensional, exceto alguns pontos onde ocorre gigantismo de minerais, geralmente rodeados por massas de quartzo.
- Ocorrem em pequeno número.

Em relação a mineralogia, os pegmatitos graníticos da região de Pedra Lavrada e Nova Palmeira são formados por feldspato potássico, quartzo, moscovita e, geralmente em menor quantidade, albita, biotita, turmalina negra e granada. A mineralogia acessória é vasta, destacando columbita – tantalita e cassiterita (SOARES, 2004).

O mineral quartzo abundante nos pegmatitos da região, não ocorre sob forma de cristais bem formados, distribui-se em todas as unidades, inclusive intercrescidos com os feldspatos. O quartzo do núcleo no corpo geralmente é leitoso (maioria dos pegmatitos), e mais raramente fumê, róseo ou citrino ou mesmo ametista. Em um mesmo núcleo podem ocorrer mais de um tipo de quartzo.

A ocorrência de feldspato é de dois tipos: K – feldspato potássico e albita, sendo esta última mais comumente na variedade cleavelandita, quando em corpos de substituição, geralmente associado a micas. Os K-feldspatos ocorrem normalmente intercrescidos em quartzo e micas, ou formando grandes cristais. Da Silva (1984), estudando a triclinicidade dos feldspatos concluiu que eles são microclínio intermediários, com ortoclásio ocorrendo restritamente.

As micas são predominantemente moscovitas, e ocorre em dois tipos: uma em grandes placas, típico do zoneamento primário, outra secundária, em pequenas placas, de cor predominantemente verde, que ocorre em corpos de substituição, associada geralmente a albita, quartzo, lepidolita e as vezes elbaíta. A biotita ocorre esporadicamente em alguns pegmatitos da região (SOARES, 2004).

Adusumilli (1976) realizou um estudo sobre os nióbios-tantalatos do Nordeste do Brasil. Elaborou uma revisão bibliográfica desses, incluindo mineralogia, cristalochímica, modo de ocorrência e importância econômica, descrevendo detalhadamente os minerais de Nb e Ta que ocorre no Nordeste. Pode-se dizer que as espécies cristalinas de maior frequência são columbita – tantalita e tapiolitas. Estudou e identificou os minerais bismuto-tantalita, wodginita, ilmenorulito, microlitas e storingita.

2.3 QUARTZO

O mineral quartzo (SiO_2) corresponde a cerca de 12,6% na crosta terrestre, e ocorre em 14 formas alotrópicas, dependendo da temperatura e da pressão de formação. Esses tipos alotrópicos são classificados como: quartzo- α , quartzo- β , tridimita e cristobalita. A partir das mudanças de temperatura, acontece algumas transformações de fase, tais como: quartzo- α para quartzo- β a 573 °C (846 K); quartzo - β para tridimita a 870 °C (1143 K) e tridimita para cristobalita 1470 °C (1743 K). Essa transformação de quartzo- α para quartzo - β , engloba pequenos ajustes nas posições atômicas, e não proporciona a quebra das ligações (FRONDEL, 1962; KRBETSCHEK et al., 1997).

Entende-se que o quartzo - α é a forma alotrópica do óxido de silício de maior quantidade na crosta terrestre, tendo em vista sua estabilidade à temperatura ambiente. O mesmo apresenta inúmeras variações cristalinas, como: quartzo hialino ou cristal de rocha, quartzo leitoso, quartzo esfumado, quartzo róseo, quartzo roxo (ametista), quartzo negro (mourion), quartzo verde (prásio) e quartzo amarelo (citrino).

Baseado na Agência Nacional de Mineração – ANM, o território brasileiro apresenta as principais reservas naturais de quartzo, de excelentes condições cristalina. O quartzo - α possui diversas propriedades, e a principal é a piezeletricidade. Essa propriedade proporciona que os cristais de quartzo- α possam ser empregados em equipamentos eletrônicos, sensores de massa, pressão, cristais osciladores e filtros de precisão para controle de frequência, etc. (BARBOSA; PORPHÍRIO, 1995).

2.3.1 Propriedades

O mineral quartzo apresenta inúmeras propriedades, e uma das mais importantes é a piezeletricidade. Essa propriedade é observada a partir da aplicação de uma tensão mecânica ao cristal, que resulta em polarização elétrica, ou na situação inversa, quando a aplicação de um campo elétrico proporciona a deformação do cristal (LUZ; BRAZ, 2000).

Outras características apresentadas pelo mineral quartzo são: transparência nas faixas do espectro do ultravioleta até o infravermelho, boa resistência à radiação, nível baixo de coeficiente de dilatação térmica, recepção e emissão de ultrassons, e ainda tem largo emprego na indústria eletrônica e óptica. Também é possível mencionar: densidade específica de 2,65 g/cm³, alta resistividade elétrica e dureza 7 na escala de Mohs (ABDALLAH, 2010).

O quartzo também apresenta, como propriedades físicas extremamente importantes, características elásticas e ópticas. Essas propriedades são fundamentais no ressonador a quartzo,

que dependem da estabilidade e linearidade das propriedades elásticas, e na produção de dispositivos ópticos, que está associado a transmitância em uma ampla faixa do espectro eletromagnético (LUZ; LINS, 2008).

2.3.2 Ambiente de formação e formas de ocorrência

O mineral quartzo é produzido em zonas de baixa solubilidade de sílica, sendo necessário que ocorra em temperaturas de aproximadamente 300 °C. Esse mineral ocorre na natureza em vários ambientes geológicos, e seu aspecto visual está associado as condições de sua formação. Foi possível obter um acervo considerado em relação as suas condições genéticas, a partir das inúmeras pesquisas ao ambiente de formação do quartzo (CORREA, 2010).

Como dito anteriormente, o quartzo encontra-se na natureza em grande quantidade, e sua ocorrência no Brasil, e no resto do mundo é significativa, estando presente em todas as rochas existentes. Entre todos os minerais é o mais comum, sendo abundante nas rochas ígneas (pegmatitos, granitos, riolitos), metamórficas (gnaisses, xistos e quartzitos) e sedimentares, apresentando grãos de quartzo que formam o arenito (CORREA, 2010).

Esse mineral é depositado como solução, e está sempre presente nos veios e gangas, constituindo sílex depositado como nódulos nos fundos marinhos. As soluções que possui sílica, tem a capacidade de trocar camadas de calcários por chert, que é uma espécie criptocristalino de quartzo, ou as camadas de chert podem ser formadas contemporâneas aos calcários (DIANA, 2004).

Também apresenta alta resistência ao intemperismo físico e químico. Isso acontece por possui ligação química e dureza elevada entre os minerais formadores de rocha, e ausência de clivagem. Quando o quartzo ocorre em rochas graníticas, o mesmo estará associado aos minerais de feldspato e mica (BRANCO, 1984).

Na natureza a existência de quartzo ocorre por todo mundo e de forma abundante, mas mesmo assim a disponibilidade de reservas são pequenas, acontecendo em poucos lugares ou países. No caso do Brasil, a ocorrência de mineral de quartzo representa a maior parte da reservas mundiais (ARCOVERDE, 1998).

Entre as rochas que ocorrem na natureza, as rochas sedimentares apresentam uma enorme quantidade de quartzo, e são as principais fontes de matéria prima de sílica (SiO₂), para ser empregado nas indústrias. Em países europeus, como a Alemanha, cerca de 80% das matérias primas de quartzo empregadas nas industrias, são classificadas como areias de quartzo de pureza alta. Essas areias são direcionadas ao mercado de fundição e vidro (GOTZE; MOCKEL,

2012). Na Tabela 1 é apresentado o emprego do mineral de quartzo existentes nas rochas ígneas, metamórficas e sedimentares (GOTZE; MOCKEL, 2012).

Tabela 1 - Rochas que apresentam o mineral de quartzo e suas utilizações

Rocha	Propriedade	Utilização
<i>Magmática</i> Quartzo de alaskito	Pureza química	Material de SiO ₂ de alta pureza, ótica e tubo de lâmpada
<i>Magmática</i> Pegmatito e quartzo hidrotermal	Pureza química e cristal perfeito	Quartzo óptico e piezoelétrico
<i>Metamórfica</i> Quartzito Morfogênese e quartzo móveis	SiO ₂ > 96% e granuloso	Materiais refratários e ligas de silício
<i>Sedimentar</i> Areia de quartzo	Pureza química Pureza química e propriedades granulométricas	Indústria de vidro e fundição
Cascalho de quartzo	Pureza química e tamanho de grãos	Ligas de silício e indústria de construção
Quartzito sedimentar	Pureza química e sílica criptocristalina	Materiais refratários

Fonte: Gotze; Mockel (2012)

2.3.3 Variedades do quartzo

Existem diversas variedades do mineral de quartzo, e sua ocorrência na natureza é classificada em macrocristalina ou cristalina e criptocristalina ou microcristalina. Os principais países que produzem o mineral de quartzo são: Brasil, África do Sul, Japão e Suíça (MME, 2009).

2.3.3.1 Variedade cristalina

É um tipo de ocorrência que tem cristais bem visíveis ou estrutura cristalina macroscópica. Nesse caso, é utilizado o termo quartzo macrocristalina e/ou simplesmente o termo "quartzo". Em muitas situações não é mencionado qual é a variedade do mineral de quartzo, e ao usar apenas o termo quartzo, estará se referindo aos quartzos microcristalinos, tais como: cristal de rocha (variedade de quartzo transparente ou hialino), ametista, citrino, quartzo fumado, quartzo leitoso e rosa, etc. (MATEUS, 2008).

De todos os tipos descritos, o quartzo leitoso e o cristal de rocha são os mais empregados nas indústrias. Em relação aos outros tipos, a grande maioria é utilizado em ornamentação (jardins e piscinas) e como pedras preciosas. Alguns tipos apresentam impurezas, como por exemplo o quartzo rosa, que tem alta concentração de fósforo, e assim, não pode ser empregado na fabricação de silício de grau solar - SiGS (ABDALLAH, 2010, LUZ; BRAZ, 2000, GOTZE; MOCKEL, 2012, KOGEL et al., 2006).

2.3.3.2 Quartzo leitoso

O mineral quartzo leitoso (Figura 5) é conhecido como uma das espécies mais comum entre os tipos coloridos, e é uma grande fonte de matéria prima na fabricação de silício. Nesse processo de produção, esse mineral é submetido a uma redução carbotérmica, para a obtenção do silício grau metalúrgico – SiGM (MARQUES, 2013).

A aparência branca leitosa é resultado da existência de minúsculas inclusões fluídas em sua composição, fazendo com que o mesmo seja translúcido. Esse tipo de minério é comum em regiões de pegmatitos e em veios hidrotermais (CORREA, 2010).

Figura 5 - Cristal de quartzo leitoso do garimpo Alto dois Irmãos



Fonte: Autoria própria (2022)

2.3.4 Usos e especificações da variedade cristalina do quartzo

O mineral quartzo é utilizado em várias áreas da indústria, e para seu emprego em muitos casos é necessário passar por um processo de cominuição, e em outros é requerido um bom conhecimento tecnológico. Esse mineral tem um mercado amplo e a tendência é de crescimento, devido a sua aplicação nas áreas da computação, energias e telecomunicação (LUZ; LINS, 2008).

Entre as diversas utilizações, existe aquelas que requerem especificações físicas e químicas específicas. Quando do seu uso para produtos nobres (dispositivos piezelétricos e sementes para produção da barra mãe-quartzo cultivado), o mesmo não poderá apresentar defeitos no cristal.

No caso da produção de vidros convencionais, corpos de porcelana, e sílica vítrea, é fundamental apresentar as características de aumento de pureza e a redução de tamanho das partículas (LUZ; LINS, 2008).

Na Tabela 2 é apresentado a quantidade de percentagens dos elementos químicos, que podem compor o mineral quartzo, em suas aplicações (ABDALLAH, 2010).

Tabela 2 - Especificações químicas do mineral quartzo para uso nas indústrias

Utilização SiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO%	MgO%	Tamanhos dos Grãos
Vidro ótico	99,5	0,1-0,5	0,008	Na	-	µm
Vidro colorido	99,5	0,1-0,5	0,013	Na	Baixo	µm
Vidro planos	98,3	Variável	0,030	Na	-	µm
Areia para Fundição	88-99	Variável	Na	Na	Variável	8330-74 µm
Sílica Pulverizada	97-99,9	0,5	0,2	Baixo	Baixo	-37 µm
Ferrossilício	96	0,4	0,2	Baixo	Baixo	2,54-5,18 cm
Silício metálico	98	0,4	0,2	0,2	0,2	2,54-5,18 cm
Tijolo Refratário	96-98	0,1	-	Baixo	Baixo	-2,36 mm
Silicato de Sódio Fluxo	99	0,25	0,03	0,5	0,5	8330-149µm
Metálico	90	1,5	1,5	0,2	0,2	<5,18 cm
Oscilador Frequência	99,9	0,004	0,001	0,06	Na	Na
Quartzo Cultivado	99,5	0,5	0,15	0,03	0,05	0-10 cm
Tintas	99,8	Na	0,2	Na	Na	-74 µm
Eletrodos	98	-	Na	Na	-	Na
Areia para Construção	80	-	-	Na	Na	<20 mm

Fonte: Barbosa; Porphírio (1995)

Notas: Na (não alisado)

Vale ressaltar que as especificações citadas na Tabela 2, representa um referencial para ser empregado, mas esses valores podem sofrer alguma variação. As exigências são de acordo com aplicação do quartzo para cada tipo de indústria. No caso das empresas solares, conhecidas como fotovoltaicas, são utilizados minerais de quartzo de alta pureza.

Podemos mencionar que o uso desse mineral ocorre no formato de lascas de quartzo e blocos de cristais. As lascas de quartzo tem seu emprego na fabricação de sílica vítrea de alta pureza, e em seguida é usada na produção de vidros especiais e fibras ópticas. As lascas também são usadas na fabricação de quartzo cultivado, nesse caso as de segunda. As de inferior qualidade (lascas de terceira, quarta e quinta) são empregados na fabricação de silício grau metalúrgico, na produção de fibras ópticas e silício grau semicondutor. Já as lascas que

apresentam baixa transparência são utilizados na produção de tintas anticorrosivas, produção de vidros e outros (LUZ; LINS, 2008).

Os blocos de cristais de quartzo de alta de transferência, no qual são realizados os processos de corte, caracterização, e inspeção, são direcionados aos segmentos estratégicos, tais como: produção de sementes para a fabricação de barras – mãe de quartzo cultivado (LUZ; LINS, 2008).

Quando esses blocos forem considerados de segunda, terceira ou mista, o mesmo será fragmentado para a produção de lascas de quartzo de alta pureza, que serão utilizados na produção de quartzo cultivado, cerâmicas especiais, quartzo fundido e microcircuito de alta integração (LUZ; LINS, 2008).

O quartzo cultivado é utilizado para produzir componentes eletrônicos, como: cristais osciladores, filtros, filtros monolíticos e transdutores, que são empregados nas indústrias de eletrodomésticos, eletrônica e de telecomunicações (LUZ; LINS, 2008). Por fim, resume-se que as lascas de quartzo consideradas de primeira qualidade, tem aplicações mais nobres. Enquanto as lascas de quartzo de terceira, quarta e quinta, são destinadas a produção de silício de grau metalúrgico (SiGM). A Tabela 3 apresenta as especificações das lascas de quartzo para sílica vítrea e SiGM.

Tabela 3 - Especificações das lascas de quartzo usadas na fabricação da sílica vítrea e SiGM.

Insumo	Parâmetro	SGM	Sílica Vítrea
Lascas	Tamanho de Partícula	2,54 a 5,18 cm	0,1 a 0,4 mm
Lascas	Fraturas	Não afeta	Mínima
Lascas	Inclusões Sólidas	Mínima	Inadmissível
Lascas	Inclusões Fluidas	Não afeta	Inadmissível
Lascas	Geminações	Não afeta	Não afeta
Lascas	Discordâncias	Não afeta	Não afeta
Lascas	Alumínio	<200 ppma	<10 ppma
Lascas	Metais de transição	<50 ppma	<2 ppma
Lascas	Metais alcalinos	<100 ppma	<5 ppma
Lascas	Grupos OH e H ₂ O molecular	<300 ppma	<30 ppma

Fonte: Luz; Lins (2008)

Notas: ppma – partes por milhão atômico(N/10⁶Si)

2.3.5 Lavra e beneficiamento de quartzo

No Brasil a extração do mineral de quartzo é a realizada em lavra a céu aberto e geralmente de forma manual. Enquanto que a lavra subterrânea, acontece por meio de poços ou túneis. A lavra do quartzo ocorre em afloramentos, e são realizadas em sua grande maioria, as operações manuais (pá e picareta) e em pequenas quantidade as operações mecânicas, com emprego de pá carregadeiras (LUZ; LINS,2008).

Quando das atividades de extração em veios hidrotermais, essa operação acontece na forma vertical. O procedimento de retirada do minério ao encontrar a massa de quartzo, formada por regiões leitosas, é feito pelo uso de equipamento simples, como a ação mecânica de marretas e martelos, e em raras situações através de explosivos granulados.

Os garimpos onde ocorrem a lavra do minério, possui frentes de extração com medidas de comprimento e profundidade de dezenas de metros. Esse material de quartzo desmontado ou retirado, representado por blocos, são reduzidos em blocos de tamanhos menores, com o propósito de fazer uma separação por transparência visual (LUZ; LINS,2008).

Na maioria dos casos de exploração de pegmatitos, o mineral de quartzo é considerado como subproduto, da extração de gemas, tais como: água marinha, berilo, turmalinas, e topázio. A realização da extração nos pegmatitos é a céu aberto e pode acontecer de forma manual, através de pás e picaretas. Atualmente em alguns casos são usados explosivos e o minério é lavrado de forma mecânica, com pá carregadeira. Os garimpos de onde são retirados os materiais, estão localizados em pegmatitos, é o caso dessa pesquisa (LUZ; LINS,2008).

Em período anterior a II Guerra Mundial a exploração dos depósitos era realizado por grupos de garimpeiros, e de maneira artesanal, imaginava-se que seria mais econômico do que empregar explosivos e máquinas. Porém, com a chegada da Guerra, ocorreu um consumo demasiado do mineral quartzo, já que o mesmo é aflorante em superfície, proporcionando a existência de uma lavra predatória. Supõem-se que exista um grande número de depósitos de quartzo, completamente abandonados em alguns estados do Brasil (LUZ; LINS,2008).

No que se refere a pesquisa mineral de quartzo em pegmatitos e veios hidrotermais, a realização é considerada inexistente, contribuindo para a falta de conhecimento na avaliação econômica e do projeto de lavra. A falta desses trabalhos de pesquisa não são exclusivos para o quartzo, também abrange boa parte dos minerais industriais.

A exploração dos depósitos são dificultadas pela forma de ocorrência dos corpos de minério, devido ao volume e a distribuição do mineral ser bem disperso. Essa forma de distribuição do corpo, não favorece a mecanização e a utilização de mão de obra qualificada, para o planejamento e a lavra do mineral de quartzo (LUZ; LINS,2008).

As primeiras atividades de mineração registradas na lavra de pegmatitos na PPB são da época da I Guerra Mundial, com objetivo de produzir mica. A partir dos anos de 1930, buscou-se por minerais de tântalo e nióbio, desencadeando o aumento da exploração de pegmatitos, que atingiu seu nível máximo durante a II Guerra Mundial (LUZ *et al.*, 2002; SILVA; DANTAS, 1984).

As informações técnicas e econômicas acumuladas ao longo de anos de estudos não foram aplicados para promover melhorias nas metodologias de extração e beneficiamento, uma vez que elas continuam reproduzindo práticas das primeiras décadas de atividades extrativas na PPB (LUZ *et al.*, 2002).

Na região da Paraíba, Rio Grande do Norte, e norte de Minas Gerais localizam-se as principais províncias pegmatíticas do País, e de modo geral, os métodos de exploração e lavra adotados, são empíricos, predatórios, e ausente de orientação técnica da Engenharia de Minas.

Uma grande parte da produção de quartzo e/ou feldspato no Brasil é realizada em pequenas minas, por garimpeiros, inclusive o pegmatito Alto Dois Irmãos – PB, situados próximo ao município de Pedra Lavrada – PB, que será analisado nesta pesquisa (Figura 6). Nesse pegmatito é usado métodos e equipamentos rudimentares, com pouca mecanização.

Figura 6 - Vista do pegmatito Alto Dois Irmãos



Fonte: Autoria própria (2022)

Nas unidades de beneficiamento das empresas, Mineração Florentino, Elizabeth Produtos Cerâmicos Ltda, e Armil Mineração do Nordeste Ltda, o quartzo e/ou feldspato são beneficiados através das operações de britagem, moagem e classificação, produzindo granulados de qualidade e de boa aceitação no mercado. O *Run Of Mine* (ROM) do minério

vindo da lavra, é descarregado próximo à unidade de beneficiamento, e às vezes despejado diretamente no alimentador vibratório, do tipo grelha.

As etapas do processo de beneficiamento dos pegmatitos na Mineração Florentino são formadas por três percursos distintos no processo de cominuição, a depender do minério a ser trabalhado.

O primeiro circuito (Figura 7) é destinado aos pegmatitos que apresentam substâncias minerais como calcários, e feldspatos contendo impurezas, e com granulometrias grosseiras. Nesta linha de produção tem-se um britador de mandíbulas, que recebe material de um caixão de alimentação inclinado e vibratório. Em seguida esse material fragmentado vai a um moinho de martelos, e pode ser reduzido a uma granulometria de até 2,0 mm.

Figura 7 - Britador de mandíbulas primário da Mineração Florentino



Fonte: Autoria própria (2022)

No caso do quartzo e/ou feldspato, o processo de cominuição é realizado em outro circuito, diferente do anterior. A britagem é feita com uso de dois (02) britadores de mandíbulas, onde o material é submetido à britagem primária e secundária (Figura 8), sendo reduzido a uma granulometria menor que $\leq 25,0$ mm. Após a fragmentação, segue em uma correia transportadora para alimentar o moinho de bolas de seixos (Figura 9), onde a granulometria do quartzo será reduzida a $< 0,147$ mm.

Figura 8 - Britador de mandíbulas secundário da Mineração Florentino



Fonte: Aatoria própria (2022)

Figura 9 - Moinho de Seixos da Mineração Florentino



Fonte: Aatoria própria (2022)

O terceiro é destinado para o tratamento das micas, equipado com um moinho de rolos e uma peneira vibratória. A alimentação é proveniente do primeiro circuito.

2.4 COMINUIÇÃO

Entende-se por cominuição, o conjunto de operações de redução de tamanhos de partículas minerais, executado de maneira controlada e de modo a cumprir um objetivo pré-

determinado. Sendo necessário manter as exigências de controle do tamanho máximo dos produtos e de evitar a geração de quantidades excessivas de finos (CHAVES; PERES, 2003).

As razões da necessidade das operações de cominuição na indústria mineral são descritas abaixo.

- Para permitir o manuseio do material de mineração. “Em muitos casos, é preciso reduzir o volume, por exemplo: um bloco de calcário de 44”. Precisa, portanto, ter o seu volume reduzido para poder ser movimentado.
- Para permitir o transporte contínuo: transportadores de correia são, em princípio, mais convenientes do que caminhões ou outros veículos a diesel, pois, custam mais barato, usam energia elétrica, são silenciosos e sobretudo, operam continuamente. Entretanto são limitados quanto ao tamanho das peças que podem transportar: para cada largura de correia existe um tamanho máximo capaz de ser transportado sem problemas. Grosseira e aproximadamente, ele é um terço da largura da correia. Então, para qualquer transporte em transportadores de correia, o minério precisa estar britado.
- Para permitir a utilização do minério: a brita para concreto ou pavimentação deve ter tamanhos bem definidos, carvão para ser queimado em grelhas precisa ser graúdo e isento de finos. Já para ser queimado em maçaricos, precisa estar finamente pulverizado: calcário para calagem de solos deve estar numa granulometria suficientemente fina para oferecer uma área de superfície adequada para a boa dissolução pelos ácidos do solo.
- Para liberar as partículas dos minerais úteis e dos minerais de ganga e permitir a sua separação, através dos processos de concentração, em concentrados, rejeitos e produtos intermediários.

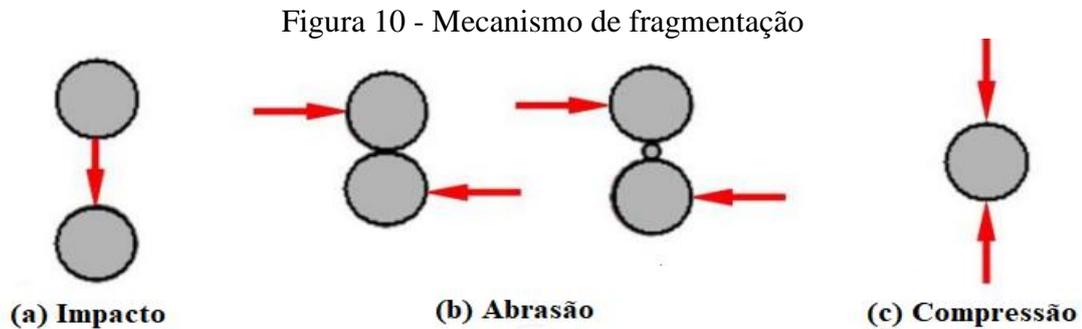
As operações de cominuição são a britagem e moagem, elas são diferentes não só em termos da faixa de tamanhos considerada, como principalmente, dos mecanismos de redução de tamanhos envolvidos. Nos processos de britagem, as partículas grosseiras sofrem a ação de forças de compressão ou de impacto. Os processos de moagem se restringem às frações mais finas e utilizam mecanismos de abrasão e arredondamento (quebra de arestas).

Na etapa de britagem, tem-se uma relação de redução pequena: as forças aplicadas são elevadas e a geometria do equipamento tem importância fundamental. Enquanto na etapa de moagem, leva a relações de redução grandes e usualmente é feita em dois estágios, a grossa em moinho de barras e circuito aberto e a fina em moinhos de bolas, em circuito fechado.

As operações de cominuição podem ser feitas a seco ou a úmido. “A úmido” significa que a moagem é feita numa polpa com água suficiente para o transporte dos sólidos. “A seco”

significa com a umidade natural do minério, isto é, sem adição de água, o que é possível somente até certo limite de umidade.

A energia mecânica necessária à cominuição é aplicada por meio dos seguintes mecanismos: impacto, abrasão e compressão (Figura 10). A abrasão é considerada por alguns autores como um quarto mecanismo de importância em alguns casos especiais de moagem.



Fonte: Adaptada de Foggiatto (2009)

Na quebra por impacto, com esforços aplicados rapidamente, a partícula sofre uma pressão elevada e como resultado absorve mais energia do que a necessária para uma simples fratura e fragmenta-se principalmente por tensão, não havendo deformação. O produto apresenta-se como partículas de tamanho e forma semelhantes (LUZ *et.al.*, 2010).

Quando as partículas irregulares são sujeitas à quebra por compressão, os produtos se apresentam em duas faixas de tamanho: partículas grossas resultante da quebra induzida pela tensão, e partículas finas da quebra por compressão no local onde a carga é aplicada (Figura 10 b). A resistência das rochas à compressão é muito maior que a resistência à tração quando, geralmente, a ruptura se produz ao longo dos planos de cisalhamento.

O cisalhamento, ou abrasão, pode ocorrer quando a força aplicada não é suficiente para provocar a fratura em toda a partícula, gerando pequena diminuição do tamanho da partícula original e a formação de partículas muito finas (VALADÃO, *et al.*, 2007).

2.4.1 Moagem

O processo de moagem compreende as operações de cominuição na faixa de tamanhos abaixo de $\frac{3}{4}$ " e é efetuada mediante os mecanismos de arredondamento das partículas, quebra de pontas e abrasão. (CHAVES; PERES, 2003).

A moagem refere-se ao estágio do processo de fragmentação. É nessa fase que as partículas são reduzidas pela combinação de impacto, compressão, abrasão ou atrito, a um tamanho adequado à liberação do mineral de interesse, geralmente, a ser concentrado nos processos subsequentes. Tem-se que para qualquer minério existe uma malha ótima para ser

moído, dependendo de muitos fatores, incluindo a distribuição do mineral útil na ganga e o processo de separação que vai ser usado em seguida (LUZ *et.al.*, 2010).

A moagem é a área da fragmentação que requer maiores investimentos, ocorre maior gasto de energia e é considerada uma operação importante para o bom desempenho de uma instalação de tratamento de minérios. Observa-se o quanto é importante o estudo da moagem na fase de dimensionamento e seleção dos equipamentos, e também um bom controle na etapa de operação da usina, pois, a eficiência de uma instalação industrial depende em muito da operação de moagem (LUZ *et.al.*, 2010).

Na cominuição, a operação unitária de moagem tem como objetivo:

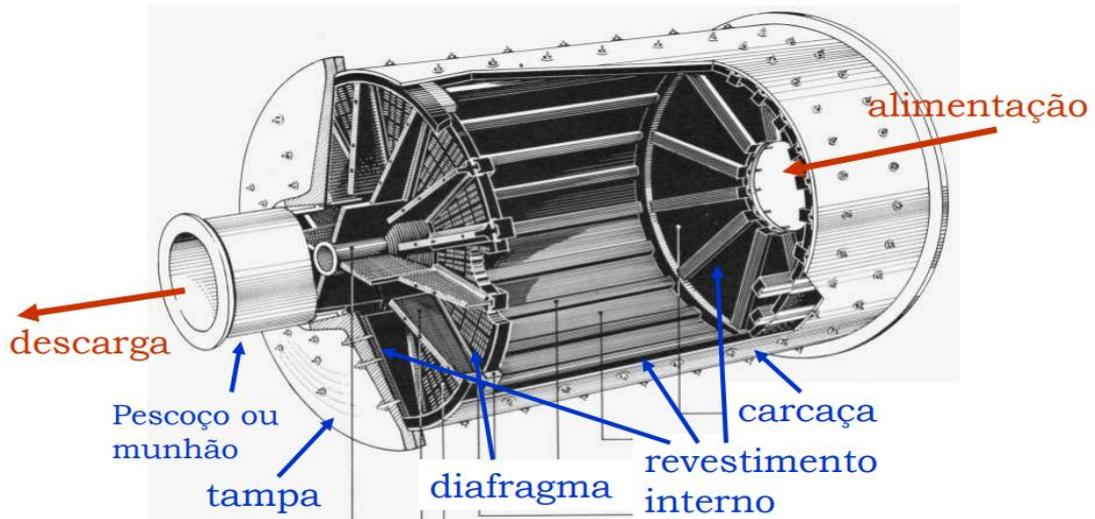
- Liberação das espécies minerais com vistas às operações de concentração subsequentes;
- Adequação de produtos às especificações granulométricas industriais: talco, cargas, etc;
- Transporte em minerodutos: concentrado de fosfato na Fosfértil. pellet feed da Samarco;
- Adequação à utilização subsequente: moagem do pellet feed para a pelotização, aumento da área de superfície para facilitar a reação química em processos hidrometalúrgicos.

Moinhos tubulares ou de carga cedente

Os moinhos de carga cadente são equipamentos de moagem largamente empregados na indústria mineral, e são denominados: moinhos de barras, moinhos de bolas e de seixos. Os moinhos de martelos têm sua faixa de aplicação para materiais específicos, como calcários e carvões, para aplicações especiais utilizam-se moinhos vibratórios, de discos, de impacto de partículas e outros (CHAVES; PERES, 2003).

Os equipamentos de moagem, como os moinhos de carga cadente (Figura 11), são formados por um corpo cilíndrico que gira em torno de seu eixo. Possui uma carcaça composta de chapa calandrada e soldada. A chapa recomendada apresenta uma espessura que varia entre 1/100 e 1/75 do diâmetro do moinho. Os moinhos são sempre revestidos internamente por material resistente ao desgaste, metálico ou de borracha. Eventualmente, encontram-se moinhos com revestimento cerâmico (CHAVES; PERES, 2003).

Figura 11 - Moinho tubulares ou de carga cadente



Fonte: Bergerman (2012)

Moinho de Bolas

Nas etapas finais do processo de fragmentação são empregados os moinhos cilíndricos, e são usadas bolas como meio moedor. Esse tipo de meio moedor é destinado à moagem fina, devido às bolas apresentarem maior área superficial, por unidade de peso, do que as barras. Denomina-se o termo moinho de bolas aos equipamentos que têm a relação comprimento/diâmetro de 1,5 a 1,0 e até menor (LUZ *et. al.*, 2010).

É importante ressaltar que os moinhos de bolas (Figura 12) operam com alimentação na faixa de 1,168 mm a 0,589 mm, e tem a capacidade de fornecer um produto tão fino quanto se queira. Tem-se como conhecimento que o maior moinho de bolas apresenta 5,4 m de diâmetro (CHAVES; PERES, 2003).

Os moinhos de bolas são geralmente utilizados para moagem secundária e/ou terciária para preparar o material para os processos de concentração a jusante. Outro equipamento bem usado na moagem secundária são os moinhos de seixos, onde é importante minimizar a contaminação do mineral processado (OUTOTEC, 2012).

Figura 12 - Moinho de bolas



Fonte: METSO (2005)

Moinho de Seixos

Este tipo de equipamento utiliza como corpos moedores, seixos em lugar de bolas, são materiais especiais que apresentam comportamento muito competentes. Em virtude dos seixos apresentarem menor densidade, os moinhos de bolas têm maior capacidade de moagem. No caso da região do Pegmatítico da Borborema, situada entre os estados da Paraíba e Rio Grande do Norte, os moinhos de seixos são usados na moagem de minérios de quartzo e feldspatos. Em outras regiões, e para diferentes tipos de minérios, são usados como moinhos secundários, em cuja aplicação apresentam consumo energético específico (kWh/t) sensivelmente igual aos de moinhos de bolas, tendo, porém, consumo de metais (revestimento) muito menor que os moinhos de bolas (revestimento e bolas).

A definição de moinhos de seixos (pebble mil) não é exclusiva para a moagem autógena (ou semi-autógena) secundária, refere-se também a moagem por via seca de materiais que não podem ser contaminados por corpos moedores e/ou revestimentos metálicos. Neste último caso, os moinhos de seixos usam corpos moedores de ágata, sílex, coríndon ou cerâmica, sendo os revestimentos de sílex ou cerâmica. Normalmente são de descarga por diafragma, embora, no caso de moagem muito fina, possam ser por overflow (BERALDO, 1987).

Alimentação dos moinhos

A configuração da alimentação dos moinhos tubulares vai depender do tipo do circuito de moagem, se é aberto ou fechado, a seco ou a úmido. Outro fator que influência é o tamanho

e a velocidade de alimentação. No caso dos moinhos que operam a seco normalmente são alimentados por algum tipo de alimentador vibratório. Em relação aos moinhos que operam a úmido, empregam-se diversos tipos de alimentadores. Essa alimentação é realizada de várias formas (bica de entrada, pescador duplo, alimentador de tambor, e pescador e tambor combinados), conforme Figura 13 (LUZ *et. al.*, 2010).

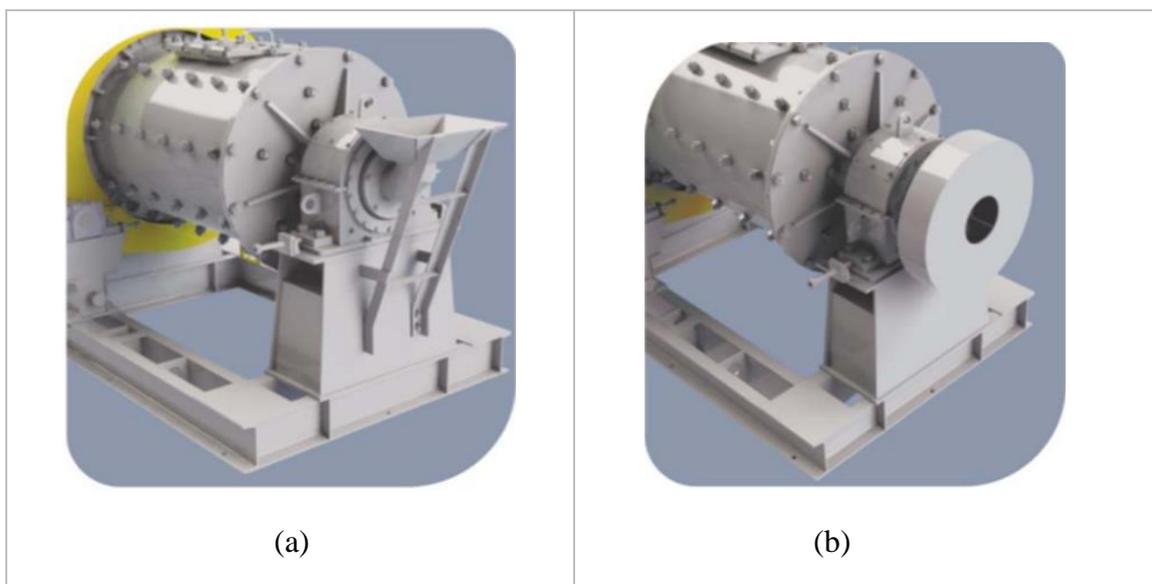
O alimentador bica de entrada é considerado entre todos o mais simples. Sendo formado por uma calha cilíndrica ou elíptica independente do moinho e lançando a polpa de alimentação no interior do cilindro. Esse tipo de sistema é usado quando a classificação é feita em ciclones montados a uma altura suficiente para alimentar o moinho por gravidade (LUZ *et. al.*, 2010).

O alimentador pescador duplo é um dispositivo frequentemente empregado para moinhos pequeno, em circuitos fechados com classificador espiral, e dispensa bomba de elevação de polpa.

No caso do alimentador de tambor, esse deve ser utilizado no lugar do alimentador bica de entrada, quando não se tem elevação do material acima da linha de centro do moinho. A alimentação entra no tambor via uma calha e uma espiral interna carrega a alimentação até o revestimento do munhão. Esse tipo de dispositivo apresenta facilidade a adição de bolas ao moinho (LUZ *et. al.*, 2010).

Em relação ao uso do alimentador pescador e tambor combinados, essa combinação é empregada na operação via úmida, para alimentação proveniente de níveis bem abaixo da linha de centro do moinho, por exemplo, no caso de ser utilizado classificador espiral.

Figura 13 – (a) Bica de entrada (b) Alimentador tambor



Fonte: FURLAN (2023)

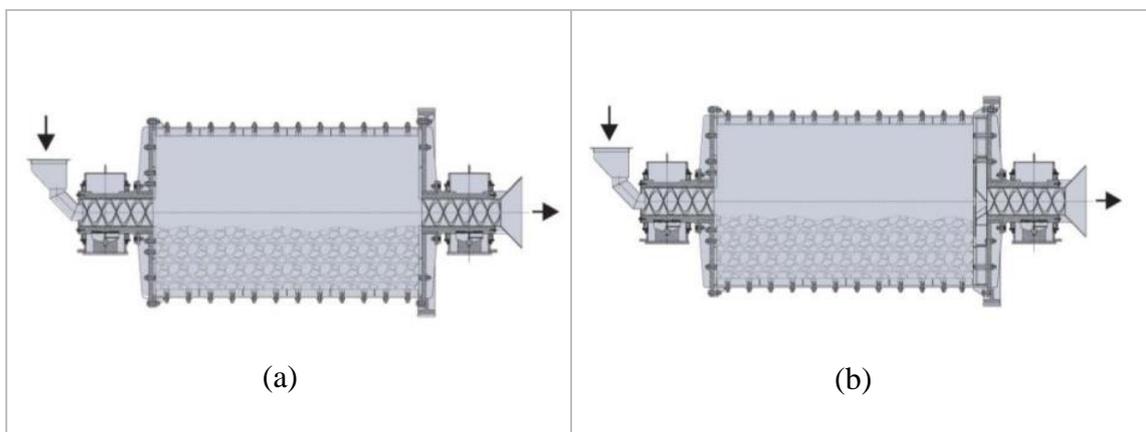
Descarga dos moinhos

Os moinhos de carga cadente, como os de barras e bolas nas maioria das vezes são classificados baseado na natureza do dispositivo de descarga da polpa durante a moagem. Em geral, quanto mais próximo da periferia da carcaça e da boca de alimentação estiver situada a saída da polpa, mais rápido o material é descarregado, e ocorre menos sobremoagem (LUZ *et. al.*, 2010).

Para os moinhos de bolas geralmente são usados dois tipos de configurações, a descarga por overflow, idêntica à do moinho de barras, e descarga através de diafragma (Figura 14).

Geralmente as configurações normamalmente utilizadas são descarga por overflow, idêntica à do moinho de barras, e descarga através de diafragma, como visto na Figura 14. A descarga por diafragma corresponde à descarga periférica dos moinhos de barras. Não se utilizam moinhos de bolas de descarga periférica porque o diafragma é muito melhor. Por outro lado, não se pode pensar em usar moinhos de barras com diafragma, pois, esta peça não resiste aos impactos das barras (CHAVES; PERES, 2003).

Figura 14 – (a) Overflow/transbordamento (b) Diafragma



Fonte: FURLAN (2023)

Para o diafragma recomenda-se alimentações grosseiras ou quando se deseja minimizar a ação de finos. Este gasta cerca de 15 a 20% a mais de potência que o moinho de descarga por overflow e consome mais corpos moedores. Pode também entupir, apesar do seu projeto ter os furos do crivo abertos na direção do fluxo.

Nos moinho de descarga por overflow, as bolas tendem a descarregar junto com produto. Para evitar a saída das bolas utilizam-se vários dispositivos, como os diafragmas, cabeças divisoras ou espirais reversas instaladas num tromel na descarga do moinho. Entretanto, infelizmente, existe uma tendência à migração das bolas maiores em direção à descarga, onde selas são inúteis (talvez arrastada pelo movimento da polpa).

Revestimento dos moinhos

Os moinhos cilíndricos são revestidos internamente de placas de desgates, metálicas ou de borrachas (Figura 15). Ao se usar placas metálicas, deve-se colocar entre elas e a carcaça um lençol de borracha ou de zinco fundido, para permitir a perfeita aderência, e evitar o atrito entre as peças metálicas, e também a entrada de partículas sólidas entre o revestimento e carcaça, minimizando os consequentes danos (CHAVES; PERES, 2003).

Os revestimentos tipo metálicos são fabricados de aços-liga ou ferros fundidos resistentes a abrasão. Não são empregados os aços mangnês Hadfield que são utilizados nos britadores, mas sim os aços cromo – molibdênio e os ferros fundidos especiais.

A utilização do revestimento de borracha tem sido largamente discutido. Este tipo de material apresenta resistência ao desgaste superior ao material metálico, são mas leves, permitem manutenção mais fácil e absorvem parte significativa do ruído. Também apresenta maior vantagem nas polpas corrosivas sobre os revestimentos metálicos. Sua aplicação não é mas generalizada devido ao seu preço muito alto (CHAVES; PERES, 2003).

Figura 15 – Fixação de revestimento metálicos



Fonte: OUTOTEC (2023)

Em alguns processos de moagem, onde não pode ocorrer contaminação com o ferro das bolas e revestimentos, são utilizados revestimentos cerâmicos e bolas de alumina de alta densidade (ou seixos do próprio material que está moendo, caso do moinho de seixos). Refere-se a aplicações especiais e restritas a moinhos de pequeno diâmetro. O revestimento desgasta-se a uma velocidade muito menor que a dos corpos moedores. Ainda não é possível afirmar que os revestimentos de borracha tendam a tomar o lugar dos revestimentos cerâmicos porque não

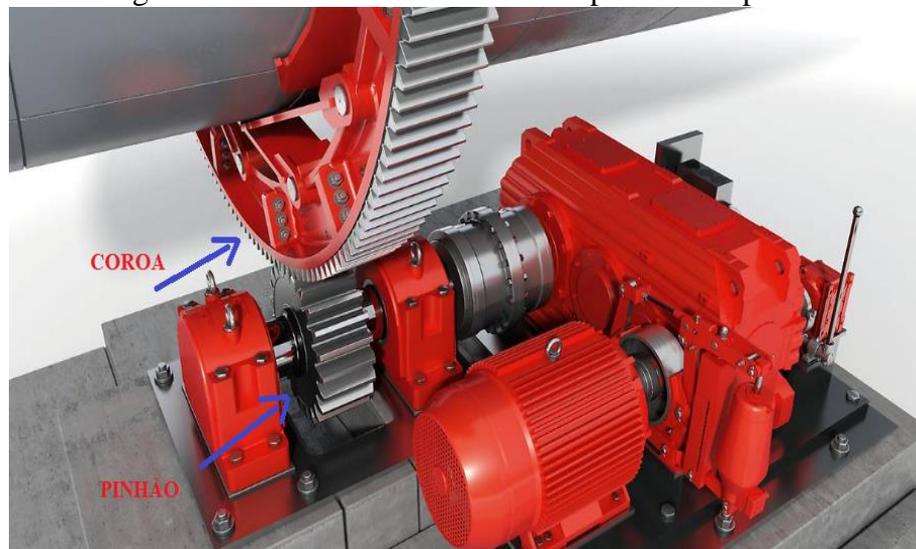
podem ser utilizados em moagem a seco (por causa da temperatura elevada dentro do moinho), ou quando a polpa tem óleo ou solventes que ataquem a borracha (CHAVES; PERES, 2003).

Acionamento

Os moinhos de bolas são acionados por meio da coroa-e-pinhão, a coroa sendo solidária ao moinho e externa à carcaça. Seu acionamento consiste na rotação do moinho através da engrenagem do pião com a coroa aparafusada em uma das extremidades do moinho (Figura 16). A coroa é fabricada em duas metades, aparafusadas, geralmente em aço fundido. Os dentes são retos até potências de 400,0 HP e helicoidais acima disso. Eles são usinados e depois cementados. O pinhão é fabricado para possuir dureza menor que a coroa, e em caso de desgaste dos dentes desta, o desgaste é compensado com eletrodo e depois reusinado. A coroa é fixada a carcaça ou a um flange preso à tampa (CHAVES; PERES, 2003).

No caso das coroas de grande diâmetro, calandra-se uma tira de chapa grossa com comprimento e espessura adequados. A coroa é fundida, geralmente em duas peças, e elas são soldadas ao anel de chapa que lhe confere mais resistência.

Figura 16 – Acionamento do moinho por coroa e pinhão



Fonte: EW – EURODRIVE PORTUGAL (2023)

Para realização de um bom projeto, recomenda-se instalar sempre o acionamento do lado oposto ao da alimentação (do lado da descarga), de modo que algum eventual entupimento que implique em derramamento da polpa da alimentação não venha a atingir a coroa, que é uma peça de usinagem muito cara (CHAVES; PERES, 2003).

Existem várias maneiras de transmitir o movimento ao moinho, e são baseados na potência, a seguir tem-se a descrição:

- Correias em V: Utilizadas até 400,0 HP, tem a vantagem que as correias podem funcionar como um elemento de proteção, rompendo-se em caso de travamento do moinho;
- Redutor ligado direto no moinho: Utilizados apenas para moinhos de grande potência. O redutor é instalado entre o motor e a coroa e precisa de dois acoplamentos flexíveis. É a instalação mais compacta.
- Motor conectado direto ao moinho: Utilizam-se para modelos maiores, motores de baixa velocidade, acoplados diretamente mediante acoplamentos flexíveis.
- Redutor mas acoplamento hidráulico: É a solução tecnicamente mais conveniente, por duas razões, permite a partida do motor a plena carga e constitui-se num elemento de proteção do sistema.

Outra forma de acionamento é o gearless - ring motor (Figura 17). Este processo é formado por elementos do motor, responsáveis pela rotação do moinho, aparafusados à carcaça, além de um estator estacionário montado ao redor dos elementos de rotação e componentes eletrônicos para conversão da corrente de entrada de 50/60 Hz para aproximadamente 1,0 Hz.

Figura 17 – Acionamento Gearless



Fonte: CITIC Heavy Industries (2023)

A carcaça se torna, na realidade, o elemento de rotação de um grande motor síncrono de baixa velocidade. A velocidade do moinho é variada pela mudança de frequência da corrente do motor, permitindo ajustes no rendimento do moinho à medida que há variação na moabilidade do minério (WILLS; NAPPIER MUNN, 2006).

Este tipo de equipamento tem como as principais características, a capacidade de variar a velocidade, o fim da limitação para o projeto de potências, elevada eficiência de acionamento,

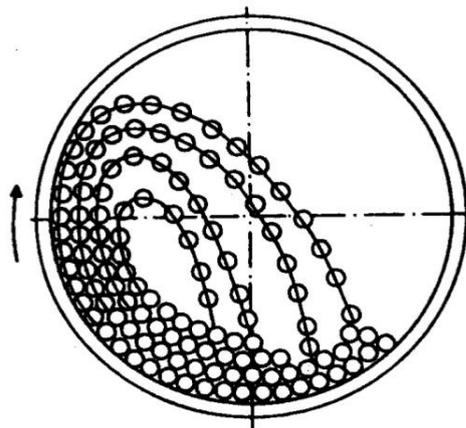
baixa necessidade de manutenção e menor espaço físico para instalação (WILLS; NAPPIER MUNN, 2006).

Regimes de operação do moinho

O regime de operação dos moinhos cadentes são influenciados pela velocidade, o fator de enchimento (isto é, o volume ocupado pelas bolas em relação ao volume do moinho) e mais outros fatores. Neste caso, ocorre dois tipos de regimes, denominados catarata e cascata.

No regime catarata (Figura 18), a velocidade do moinho carrega as bolas até uma posição bem elevada e essas caem sobre as outras bolas e sobre a polpa causando fragmentação por impacto. Deve-se usar bolas maiores para aumentar ainda mais a energia do meio moedor e baixo fator de enchimento (menos bolas). Este regime é adequado para a fragmentação de material mais grosso e para evitar a produção de finos (LUZ *et. al.*, 2010).

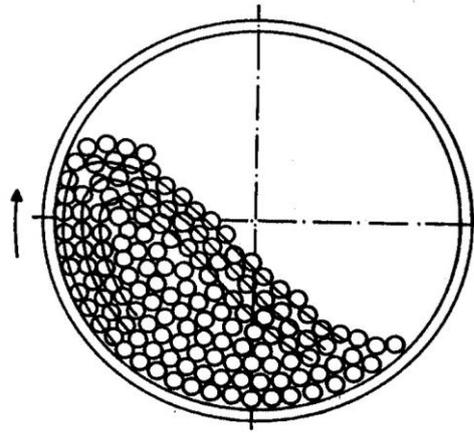
Figura 18 - Regime catarata



Fonte: Luz *et. al.* (2010)

O moinho que opera no regime em cascata (Figura 19), apresenta velocidade baixa e o alto fator de enchimento, que fazem com que as bolas, ao alcançarem uma certa altura, rolem sobre as outras, não havendo quase impacto e a moagem se dá por abrasão e atrito. Deve-se usar bolas de diâmetros menores. Este regime é adequado para a obtenção de um produto final com granulometria fina (LUZ *et. al.*, 2010).

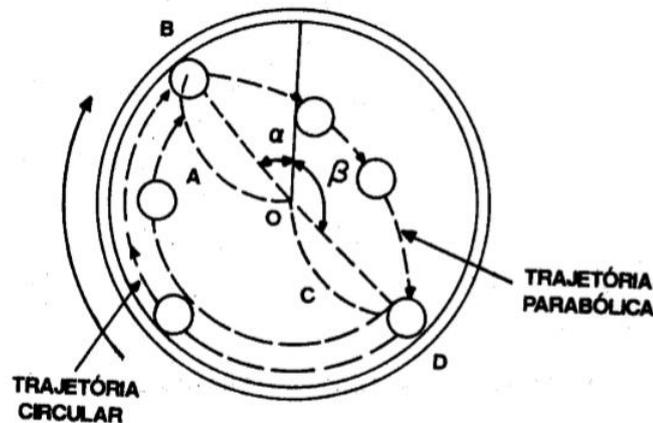
Figura 19 – Regime de cascata



Fonte: LUZ et. al. (2010)

Os meios moedores são conduzidos pelo movimento da carcaça até um certo ponto de onde caem, seguindo uma trajetória parabólica, sobre as outras bolas que estão na parte inferior do cilindro e sobre o minério que ocupa os interstícios das bolas. Estas acompanham o movimento da carcaça e impelidas pela força centrífuga percorrem uma trajetória circular. Enquanto a força centrífuga for maior que a força da gravidade, as bolas permanecem nesta trajetória. No momento que o componente da força da gravidade que se opõem a força centrífuga, for maior que esta, as bolas abandonam a trajetória circular e passam a seguir uma trajetória parabólica, conforme Figura 20 (LUZ et. al., 2010).

Figura 20 – Trajetória circular e parabólica do meio moedor



Fonte: LUZ et. al. (2010)

Ao aumentar a rotação do moinho, tem-se em um determinado momento em que a bola fica presa à carcaça, pela ação da força centrífuga, durante a volta completa do cilindro. Nessas condições, o $\alpha = 0$ e $\cos \alpha = 1$ e a bola não realiza qualquer trabalho, não havendo portanto moagem. A rotação do moinho em que isto ocorre chama-se velocidade crítica do moinho e pode ser calculada para qualquer moinho usando-se a seguinte expressão:

$$N_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{r}} \quad \text{ou} \quad (1)$$

$$N_c = \frac{54,2}{\sqrt{r}}, \text{ se o raio for dado em pés, e} \quad (2)$$

$$N_c = \frac{42,3}{\sqrt{2r}}, \text{ se o raio for dado em metros.} \quad (3)$$

Na prática os moinhos funcionam com as velocidades de 50 a 90% da sua velocidade crítica e a escolha dessas é determinada pelas condições econômicas. No entanto, quando se aumenta a velocidade do moinho, aumenta a sua capacidade de processamento, mas compromete o seu desempenho (kWh/t). As velocidades mais baixas são, algumas vezes, usadas quando não é possível atingir a plena capacidade do moinho e velocidades elevadas, para maiores capacidade de moagem grosseira (LUZ *et. al.*, 2010).

Circuito de moagem

No Tratamentos de Minérios, a moagem via úmido é o processo mais empregado, isto se deve, ao fato que a água é um excelente meio de transporte e dissipação de calor. E este método apresenta um grande benefício, ele por si só resolve o problema de abatimento das poeiras. (CHAVES; PERES, 2003).

O processamento via úmido é o mais utilizado na indústria de mineração, por ser a forma mais econômica e mais adequada aos tratamentos posteriores. A moagem a úmido apresenta como principais características: o menor consumo de energia em kWh/t, a maior capacidade por unidade de volume do moinho, torna possível o uso de peneiramento e classificação a úmido no controle do produto, elimina o problema de poeira, e torna possível o uso de meio de transporte simples como calhas, bombas e canos (LUZ *et. al.*, 2010).

No caso da moagem a seco, é utilizado quando existe empecilhos para o emprego do processamento via úmida. Um dos motivos é a falta de água, caso de instalações em regiões áridas ou semi-áridas, é quando o material a ser moído reage com a água, como é o caso da cal virgem, de clínquer de cimento portland, ou de materiais solúveis como o sal (CHAVES; PERES, 2003).

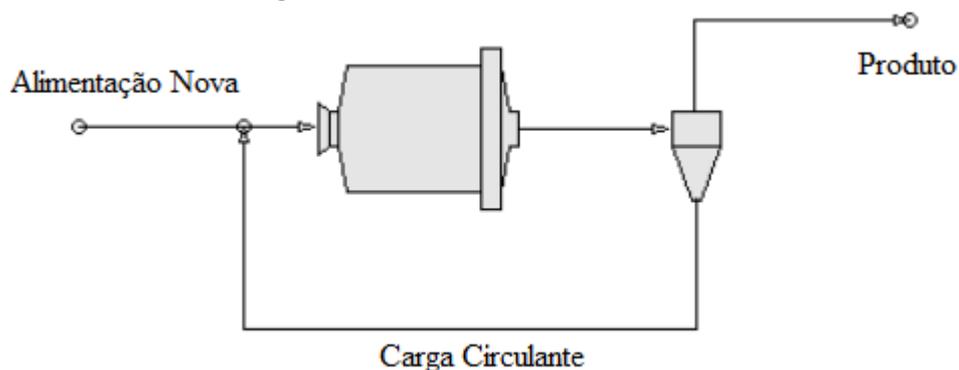
A moagem a seco também é utilizada quando o produto da moagem terá que ser secado para o processamento subsequente ou comercialização, caso do carvão pulverizado em processo industrial de combustão. Neste processo também ocorre um desgaste menor dos revestimentos

e corpos moedores. Isto decorre do fato da polpa conter eletrólitos que causam a corrosão das partes metálicas expostas. (CHAVES; PERES, 2003).

Os circuitos de moagem são divididos em dois grandes grupos: abertos e fechados. E os circuitos fechados podem ser classificados de duas formas. A primeira forma é denominada de circuito fechado normal (Figura 21), e neste caso, a alimentação nova é introduzida pelo moinho. O segundo tipo é chamado de circuito fechado reverso (Figura 22), e o moinho é alimentado pelo equipamento de classificação (CHAVES; PERES, 2003).

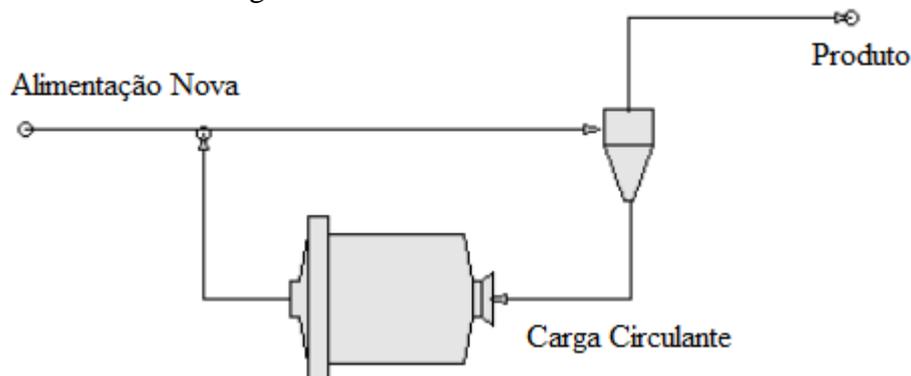
O fechamento dos circuitos de moagem pode ser realizados por diferentes tipos de equipamentos, tais como: se o material for maior que 0,833 mm até 0,208 mm, usa-se peneira vibratória; quando o tamanho das partículas for menor que 0,295 mm, utiliza-se as peneiras fixas DSM (Dutch State Mines); e também pode ser empregado os ciclones, que apresenta eficiência entre 60 e 70% ou o classificador espiral, que tem eficiência na faixa de 85 a 90% (CHAVES; PERES, 2003).

Figura 21 – Circuito fechado normal



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 22 – Circuito fechado reverso



Fonte: Autoria própria (2021)

Entre os equipamentos de fechamento do circuito de moagem, o ciclone é o tipo, mais empregado. A principal vantagem deste, decorre de sua eficiência ser inferior ao classificador

espiral, deixando sempre certa quantidade de lammas no moinho. Estas lammas são importantes para o funcionamento do equipamento (CHAVES; PERES, 2003).

No caso do circuito aberto, tem-se que o material é alimentado no moinho em uma determinada velocidade, que em uma única passagem, obtém-se um produto com o tamanho desejado. Este tipo de circuito é pouco usado, porque não existe controle da distribuição de tamanho do produto. A taxa de alimentação tem que ser suficientemente baixa para assegurar que todas as partículas da polpa sejam quebradas; com isso muitas partículas do produto sofrem sobreoagem, o que consome uma energia desnecessária e pode dificultar o tratamento subsequente (LUZ *et. al.*, 2010).

Nas empresas de mineração, geralmente a moagem é realizada em circuito fechado, com um classificador ou peneira, cuja fração grossa retorna ao moinho como carga circulante. Esta carga é um procedimento adotado com a finalidade de ajustar a distribuição granulométrica do produto do moinho. Quando se aumenta a carga circulante, também aumenta a quantidade de material que passa pelo moinho e diminui o tempo de residência de cada partícula dentro dele. Em consequência, diminui a geração de finos. A presença de maior número de partículas faz com que o efeito da carga sobre as partículas seja amortecido ("cushioning effect") o que também contribui para diminuir a geração de finos (CHAVES; PERES, 2003).

Os principais objetivos da carga circulante são : garantir o tamanho máximo do produto de moagem, e diminuir a geração de finos dentro do moinho (a carga circulante age como um amortecedor da moagem das partículas da alimentação nova, dissipando a energia mecânica aplicada sobre elas e causando a geração de menor quantidade de finos). Alguns modelos para estimar a carga circulante foram desenvolvidos, conforme a Tabela 4 (CHAVES; PERES, 2003).

Tabela 4 - Modelos teóricos para estimação da carga circulante

Circuito Fechado Normal	Circuito Fechado Reverso
Proposta por AllisChalmers, em 1953:	Proposta por AllisChalmers, em 1966:
$S = \frac{100 - r}{e - r}$	$S = \frac{1}{y} \left[\frac{100^3}{y} - 100 \cdot a \right]$
Proposta pela Faço, em 1966:	Proposta pela Faço, em 1966:
$S = \frac{(100 - a) \cdot (100 - y)}{y \cdot (100 - s)} \cdot 100$	$S = \frac{100 \cdot (100 - a)}{y \cdot (100 - s)} \cdot 100$
Proposta por Karra, em 1979:	Proposta por Karra, em 1979:
$S = \frac{100^3}{E \cdot y} - 100$	$S = \frac{100^3}{E} - 100 \cdot a$
Onde:	
S = Carga circulante;	E = eficiência da separação de tamanhos;
r = porcentagem de oversize no produto;	a = % de undersize na alimentação nova;
e = eficiência do equip. de classificação;	

y = % de undersize no produto da moagem; s = % no oversize da peneira (underflow do classificador).

Fonte: Chaves; Peres (2003)

Em consequência, é importante controlar cuidadosamente tanto o valor da carga circulante, como também as condições operacionais do classificador ou ciclone (CHAVES; PERES, 2003).

2.5 MODELOS EMPREGADOS NA COMINUIÇÃO

Um modelo é caracterizado por uma equação ou um conjunto de equações, que permiti transformar dados de entrada (input), em uma saída de resultados (output). Representa uma descrição matemática criteriosa simplificada de um fenômeno, expressando os mecanismos envolvidos, a partir de conhecimentos previamente adquiridos (POSSA, 1995).

No processo de cominuição é possível usar vários tipos de modelos matemáticos com objetivo de prever os resultados. Os modelos foram classificados levando em consideração, o detalhamento físico, e a dificuldade experimental e computacional associada ao seu uso (HERBST; FUERSTENAU, 1980)

De acordo com Luz *et. al.*, (1998), os modelos são classificados de três formas, do ponto de vista teórico.

2.5.1 Modelos empíricos

Para as operações de equipamentos de moagem, teve-se a necessidade na metade do século XIX de estabelecer condições de padrão em seu funcionamento, pois, ocorria um aumento significativo da produção de minerais. Inúmeros pesquisadores iniciaram grandes esforços buscando formulações e verificações empíricas de relações matemáticas que caracterizassem os diversos mecanismos de fratura que ocorrem nos moinhos de bolas (ALVES, 2006).

Na realização da ruptura de um corpo sólido é necessário a aplicação de esforços, e quando é suficiente, consegue-se fraturar o corpo. Quando ocorre o processo de cominuição, a coesão interna das partículas só será destruída quando os esforços externos forem superiores a resistência à ruptura das partículas, na qual envolve a propagação de trincas. Assim, quanto maior a energia absorvida pela partícula, mais fina será a distribuição de tamanhos do produto gerado pela quebra.

A expressão empírica, que se tem melhor aproximação para a absorção de energia durante a fragmentação, pode ser obtida seguindo a variação de um tamanho representativo da

população, geralmente o tamanho relativo à fração passante em 80%, à medida que o mesmo diminui gradualmente com o aumento de energia introduzida no material.

A relação entre a energia cominutiva absorvida por unidade de massa do material (E^*) e o tamanho representativo (x) é definida pela equação diferencial (TAVARES, 2005):

$$\frac{dE^*}{dx} = f(x) \quad (4)$$

Onde: $f(x)$ é uma função decrescente que reflete o fato de que mais energia é requerida para diminuir o tamanho das partículas.

Na literatura é apresentado várias formas funcionais, e as principais são conhecidas como: as Leis de Rittinger, Kick e Bond. Esses pesquisadores sugeriram funções do tipo $f(x) = -Kx^{-n}$, sendo a constante n igual a 1 para a equação de Kick, 1,5 para Bond e 2 para a de Rittinger, e K uma constante dependente do material. Aplicando a condição inicial de $E^* = 0$ para $x = x_1$ (partículas de alimentação), e $x = x_2$ o tamanho das partículas resultantes da cominuição, a equação diferencial pode ser facilmente integrada.

Observa-se que diferentes teorias relacionadas à energia de fragmentação foram sugeridas, e resultaram em diferentes interpretações dessa relação, principalmente no que se refere ao expoente n . A seguir são descritas algumas “Leis” derivada desta relação”.

Lei de Rittinger ($n = 2$)

A primeira lei de redução de tamanho foi proposta por Von Rittinger (1867), e sugeriu que a relação entre a energia específica consumida é diretamente proporcional à área superficial gerada na operação de cominuição. A área superficial específica de uma tonelada de partículas de tamanho uniforme x é proporcional a $1/x$. Assim, segundo Rittinger, a energia útil consumida por tonelada é também proporcional a $1/x$. Para Rittinger ($n = 2$), o resultado da integração será:

$$E = k \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) \quad (5)$$

Onde: x_1 e x_2 = tamanho das partículas da alimentação e do produto, respectivamente.

Esta teoria aparente ser razoável, porém, ao se realizar um diagnóstico, mas detalhado, revela-se simplificações, uma vez que Rittinger assumiu que toda energia consumida é transferida à carga a ser moída e não considerou a deformação que ocorre antes da quebra das partículas (BOND, 1952).

Lei de Kick ($n = 1$)

A segunda lei da cominuição, foi definida por de Kick (1885) considera que a energia consumida é proporcional à razão de redução, ou seja, a redução do tamanho de uma população de partículas de tamanho representativo de 100 centímetros para 10 centímetros iria consumir a mesma quantidade de energia demandada para reduzir a granulometria de uma população de partículas de tamanho representativo de 1.000 centímetros para 100 centímetros (TAVARES, 2005).

De forma análoga, para Kick ($n = 1$) tem-se:

$$E^* = k \ln \left(\frac{x_1}{x_2} \right) \quad (6)$$

A teoria de Kick é usada em materiais homogêneos, mas a energia calculada não corresponde aquela requerida na prática, pois, à influência de fraturas e outras zonas de fraquezas no processo de fragmentação.

Lei de Bond ($n = 1,5$)

No caso de Bond ($n = 1,5$), o resultado será:

$$E^* = 2k \left(\frac{1}{\sqrt{x_2}} - \frac{1}{\sqrt{x_1}} \right) \quad (7)$$

A lei de Bond, também conhecida como a terceira lei da cominuição, teria sido proposta com base na hipótese de que a interação das propriedades do material, como a tenacidade à fratura, tensões internas e o tamanho da trinca, controla as condições de fratura (Teoria de Griffith). Portanto, segundo Bond, o trabalho realizado para fraturar uma partícula será inversamente proporcional à diferença da raiz quadrada dos tamanhos do produto e da alimentação (TAVARES, 2005).

De acordo com Hukki (1961), nenhuma destas leis poderia ser usada indiscriminadamente, sendo apenas adequadas para intervalos de tamanhos distintos. A Lei de Kick se aplica melhor à cominuição grosseira ($> 10,0$ mm) e, portanto sendo usada com algum sucesso em britadores; a Lei de Bond se aplica melhor à descrição da cominuição de partículas de tamanho intermediário e, portanto à moagem grosseira (barras ou bolas); a Lei de Rittinger seria mais adequada para descrever a moagem de partículas finas (10,0 a 100,0 μm).

Embora Bond tenha provado teoricamente e seja o principal método de dimensionamento de moinhos, sendo utilizado até hoje na indústria mineral, é atualmente de consenso o

reconhecimento de que a Equação 7 é, na realidade, uma relação empírica que, em geral, se ajusta muito bem a resultados experimentais de moagem.

As três leis da cominuição, particularmente a terceira postulada por Bond (Bond, 1952), têm sido extensivamente aplicadas para dimensionamento de novas instalações nas últimas décadas. Cabe destacar que a metodologia de dimensionamento proposta por Bond é a metodologia padrão adotada por praticamente todas as empresas especializadas de engenharia (ALVES, 2006).

A metodologia empregada da terceira lei da cominuição (lei de Bond) é considerada empírica e principalmente prática, podendo conduzir a grandes discrepâncias. Ao passar do tempo, as empresas de mineração foram se desenvolvendo e as condições existentes da década de 50 modificaram-se, e a respectiva lei passou a apresentar falhas. O próprio Bond e posteriormente Chet Rowland, que o substituiu na Allis Chalmers, inseriram inúmeros fatores de correção, visando ajustar o modelo a nova realidade (CHAVES; PERES, 2003). A seguir serão apresentados os fatores de correção, e no tópico dos materiais e métodos, teremos um melhor detalhamento.

- EF1: moagem a seco;
- EF2: circuito aberto;
- EF3: diâmetro do moinho;
- EF4: alimentação com muito grossos;
- EF5: alimentação com muito finos;
- EF6: relação de redução para moinhos de barras;
- EF7: relação de redução para moinhos de bolas.

2.5.2 Modelo fenomenológico

Para diversas ocasiões, os processos estão vinculados a um sistema de partículas, onde essas partículas são criadas, como produto principal e subproduto. Nestes processos, a quantidade de partículas envolvidas, independente do equipamento, apresenta uma quantidade muito grande, que seria impossível desenvolver métodos para descrever detalhadamente o comportamento de cada partícula. Mas, tem-se a necessidade da utilização de métodos que possam descrever o comportamento da população de partículas.

Os modelos fenomenológicos são definidos, como equações que descrevem os fenômenos de um processo por meio da entrada de estados e saídas, ou seja, são equações que delineiam os balanços físicos, químicos ou físico-químicos de uma população, que sofre ação de um processo, sendo conhecido como Modelo de Balanço Populacional (MBP).

De acordo com King (2001), as diferenças apresentadas pelas partículas individuais, é o que interessa nas operações de cominuição. As principais propriedades são físicas, pois, elas influenciam o comportamento da partícula quando sujeita a qualquer processo de separação ou classificação.

Baseado em Ramkrishna (2000), para o Modelo de Balanço Populacional é necessário em processos industriais, uma análise do sistema particulado para sintetizar o comportamento da população de partículas, e de seu ambiente, a partir do comportamento de partículas isoladas em seus ambientes locais. Assim, é preciso que a população seja descrita pela distribuição de uma variável adequada, normalmente o número de partículas. Mas em algumas ocasiões por outras variáveis, como massa ou volume.

O MBP tem como principal característica apresentar o movimento de partículas em um espaço de fase. Este processo de caracterização de uma população de partículas, por meio da distribuição de partículas no espaço-fase, possibilita um procedimento de modelagem poderoso e formalizado. (KING, 2001; RAJAMANI, 1992).

Nos processos que apresentam uma ou mais coordenadas internas apropriadas, o modelo do balanço populacional pode ser usado. De maneira geral, a cominuição tem como coordenada interna de interesse o tamanho de partícula. A equação do modelo descreve as variações das características de populações de partículas para uma variedade de reatores, como: tambores de pelotização, leitos fluidizados, misturadores e moinhos (RAMKRISHNA; BORNWANKER, 1973).

Em relação aos moinhos, tem-se empregado o MBP com eficiência há mais de quatro décadas (40 anos), para descrever o processo de moagem, possibilitando desenvolver modelos que descrevam os mais variados tipos de operações.

A evolução tecnológica dos computadores permitiu surgir vários simuladores comerciais para os processos de cominuição, e esses apresentam modelos consolidados que descrevem as operações unitárias, como por exemplo: Usim Pac®, ModSim® e JKSimMet® (CARVALHO, 2009). São vários os modelos de softwares baseados no modelo de balanço populacional, sendo os simuladores ainda capazes de auxiliar o usuário a estimar, via retro-cálculo, parâmetros destes modelos para processos em estado estacionário com erros de 1 a 2% em relação ao processo (HERBST; FUERSTENAU, 1980).

De acordo com Carvalho (2009), o melhor entendimento do MBP permitiu estudar as usinas de cominuição de forma dinâmica, possibilitando a obtenção de dados para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de sistemas de controle.

2.5.3 Modelo mecanicista

O modelo mecanicista tem como objetivo criar relações detalhadas entre as condições físicas no interior do equipamento e o efeito do processo. A mecânica Newtoniana é usada no modelamento do movimento das partículas, do minério, e dos elementos do equipamento, analisando interação por interação entre partículas. Tem-se que as peças de aço, como as bolas do moinho, apresentam deformação predominantemente elasto – plástica quando submetidas a esforços mecânicos. No caso dos minérios, estes apresentam pequenas deformações elásticas antes da ruptura não possuindo um comportamento plástico. Desta forma, ao realizar esse tipo abordagem, observa-se que uma simples aplicação das Leis de Newton, muito prática, se torne muito complexa (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996).

Os pesquisadores Mishra e Rajamani (1992), realizaram uma aproximação da interação entre bolas, empregando um modelo mola/amortecedor, considerando o movimento de cada bola em cada eixo (x, y, z) como um conjunto de vetores. Os contatos entre as partículas geram uma energia, que depende da aceleração, da velocidade, e da natureza das partículas, bem como a energia absorvida por elas. Neste caso, o método utilizado para encontrar as energias envolvidas em cada contato, é o Método dos Elementos Discretos (DEM).

O Método dos Elementos Discretos é uma ferramenta de grande capacidade, que possibilita monitorar e detalhar os choques individuais entre as partículas e as bolas (no caso de moinhos de bolas) ou até mesmo visualizar e mensurar os esforços realizados sobre as partículas que estão no interior do equipamento. Para os moinhos, o DEM é utilizado para prever como a carga se comporta, baseado nos parâmetros de projeto e operacionais, tais como: o grau de enchimento, tipo de barras, e bolas elevadoras, e velocidade de rotação (CARVALHO, 2009).

Assim, por meio do DEM é possível determinar todos os espectros de energias presentes no interior do equipamento. Porém, as informações adquiridas ainda não são suficientes para definir o produto da moagem, precisando conhecer o comportamento da partícula quando submetidas aos esforços. Cho (1987) e Tavares (1997), tem estudado a quebra de partículas em micro escala, desenvolvendo diferentes modelos, alguns empíricos, que relacionam a velocidade de quebra e a distribuição da quebra com a energia aplicada para a quebra.

O modelo mecanicista depende de um bom sistema computacional para realização dos cálculos dos contatos, e no caso dos moinhos, pode ser agravante devido às toneladas de corpos moedores utilizados no equipamento. Desta forma, uma simulação de DEM, em algumas

situações podem demandar tempo, retardando uma eventual correção nas condições operacionais do equipamento.

2.6 SIMULAÇÃO DE PROCESSOS

Ao modificar os dados de entrada de uma modelo por meio de equações matemáticas que o regem, estamos tratando de uma simulação matemática. Porém, estas equações podem estar inseridas em um programa de computador, dando origem a simulação computacional. A simulação de um processo físico é um modelo matemático que representa, de forma simplificada, o comportamento de um processo.

A partir da difusão da computação no final da década de 60, a simulação passa a ser implementada de maneira significativa no tratamento de minérios. Tinha-se dificuldades para o desenvolvimento de modelos precisos, e os computadores de grande porte, concentrava-se em mãos de um pequeno número de pesquisadores e técnicos, tornando todo o processo lento. Essas dificuldades foram sendo minimizadas ao passar dos anos, graças ao desenvolvimento de computadores pessoais (PC's) com capacidade de executar grandes números de operações matemáticas em tempos cada vez mais menores, e os custos das máquinas também baixaram de forma significativa (POSSA, 1995; CARRISSO, 1995).

O desenvolvimento de máquinas baratas e velozes proporcionou um campo fértil para o desenvolvimento de programas de simulação que possibilitaram a realização de muitas pesquisas e o seu emprego em diversas usinas e projetos de engenharia. Deve ser enfatizado que a simulação é uma ferramenta que auxilia os trabalhos de um pesquisador.

A técnica de simulação é empregada para resolver problemas por análise de um modelo que apresenta o comportamento do sistema através de um computador digital (PRADO, 2010).

A simulação pode ser dividida em relação ao meio e ao ambiente no qual os modelos são executados (TRIVELATO, 2003). Nesse caso temos:

Simulação Física:

É a elaboração de modelos físicos, visando refletir os sistemas reais. Esses modelos podem ser na forma escalonada ou não.

Simulação Analógica:

Esses tipos de modelos mantêm relação de equivalência com o todo ou partes do sistema modelado, porém os sistemas são realizados em áreas diversas deste. Assim podemos dizer que a técnica de simulação analógica é a execução desses modelos nos meios analógicos.

Simulação Digital:

É representada pelos modelos matemáticos ou lógicos executados em computador digital. Está inserido nesse grupo os modelos que usam banco de dados, curvas, tabelas e outros. A habilidade de realizar modelos discretizados, contendo curvas e tabelas em computadores digitais, possibilitou aumentar o conhecimento de modelamento de sistemas, sejam variantes no tempo ou não lineares.

Modelo Computacional:

É a interpretação dos modelos matemáticos ou lógicos para a expressão computacional. Tem como base que o modelo computacional representa um modelo lógico, devido a base do computador digital ser a lógica de comutação binária. Atualmente os softwares possuem tecnologias que possibilita uma leitura e tradução automática aos consumidores.

A simulação não exclui os ensaios tradicionais, na verdade é uma parceira fundamental que possibilita promover a redução do tempo de pesquisa e a avaliação dos resultados dos ensaios. Os ensaios são importantes, pois, permiti definir os parâmetros do modelo, que por sua vez, fornecerão uma nova e conveniente quantificação do desempenho do processo simulado. A grande vantagem do processo de simulação é de ter a capacidade perfeita da reprodução de um ensaio simulado.

Ao elaborar um programa computacional para a simulação de um fenômeno, ou seja, um simulador, tem-se início à fase de validação do programa e do modelo matemático por detrás do simulador. É nesta fase que o simulador deverá ser alimentado com dados práticos, devidamente conhecidos e os resultados gerados pelo simulador deverão condizer com os resultados práticos obtidos. Nota-se, que para um bom entendimento de ambos, o modelo e o simulador, estão vinculados a representatividade dos dados, que vão alimentar e validar o simulador.

De acordo com Lynch *et al.*, (1992), os processos de cominuição tem sido estudado em detalhes ao se referir a simulação. Os modelos empregados atualmente incorporam parâmetros relacionados com as características dos minérios e dos equipamentos, e possuem equações que descrevem a interação minério equipamento. Os modelos empregados na cominuição são do tipo fenomenológicos, sendo conhecidos como modelos de balanço populacional. O processo de moagem fica definido a partir da determinação de funções de quebra e de seleção.

2.6.1 Definições sobre simulação computacional

A simulação computacional é descrita pelos autores de várias formas, porém todos são unânimes em afirmar que a mesma é imprescindível para resolver os problemas complexos das empresas.

Tem-se a opção de visualizar a simulação como método, pois é considerada uma ferramenta adequada para realizar as análises de grandes sistemas, onde acontece relações entre as atividades e são consideradas complexas, dificultando a modelagem científica (BOTTER *et al.*, 2004).

É um modelo computacional que representa um programa de computador, onde as variáveis possuem o mesmo comportamento dinâmico e estocástico do sistema real no qual representa (SHANNON, 1975).

A simulação é uma ferramenta de elevado nível técnico que está à disposição para solucionar diversos problemas. É constituída por um modelo matemático, equivalente ao sistema real, onde é possível realizar análises e experimentos de vários cenários propostos (SZYMANKIEWCI; MACDONALD; TURNER, 1988).

É vista como um processo para idealizar um modelo computacional de um sistema verdadeiro e gerir experimentos, com o objetivo de compreender o seu comportamento e analisar o plano de operação (PEGDEN *et al.*, 1995).

Considera-se a simulação um método de Pesquisa Operacional que engloba a elaboração de um programa computacional e retrata uma parcela do mundo real. No qual é possível a realização de experimentos no modelo e consegue prevê o que irá acontecer na realidade (HOLLOCKS, 1992).

É descrito como um método para solucionar uma problemática pela explicação de um modelo que discorre o comportamento do sistema, através de um computador (PRADO, 1999).

É importante compreender e conhecer as divisões sobre os sistemas do mundo real. Esse entendimento ajuda a definir o emprego da técnica de simulação. Os sistemas são apresentados da seguinte forma:

- *Determinísticos*: São os sistemas no qual os procedimentos podem ser completamente predito.

Por exemplo: Os ciclos de um robô em uma linha de montagem;

- *Estocásticos*: São os sistemas no qual os procedimentos podem ser preditos apenas em formas de distribuições de probabilidades; São conhecidos como probabilísticos.

Do ponto de vista do tempo, os sistemas são classificados em:

- *Estáticos*: São os sistemas que sofre modificações ao passar do tempo. Por exemplo: simulação geoestatística e o uso do método de Monte Carlo em resolução de integrais;

- *Dinâmicos*: São os sistemas que apresentam mudanças ao passar do tempo. Geralmente é elaborado uma variável denominada de relógio da simulação, onde é possível gerir a sequência de eventos à medida que o tempo decorre. Por exemplo: A simulação de atendimento em central telefônica e a simulação do fluxo de clientes nos caixas de um supermercado.

Baseado no comportamento em conformidade à passagem do tempo, temos que o sistema dinâmico ainda pode ser dividido em discreto ou contínuo. Como exemplo da simulação contínua, tem-se os denominados modelos elaborados por Forrester (FORRESTER, 1971).

Os sistemas discretos são caracterizados pelo fato das variáveis de estado mudarem apenas no conjunto discreto de pontos no tempo. Temos como exemplo: O banco, pois a variável de estado, o número de clientes, sofre mudança apenas quando o cliente chega ou ao término do serviço prestado ao mesmo (CARDOSO, *et al.*, 1994).

Os sistemas contínuos são conhecidos pelo fato das variáveis de estado mudarem continuamente no tempo. Podemos mencionar que a cada segundo, as variáveis adquirem novos valores (CARDOSO, *et al.*, 1994).

Também existe outras duas classificações, as terminais e não-terminais. Os sistemas terminais possuem condições fixas para o início (são condições ao qual o sistema retorna a assumir, quando se inicia cada rodada do processo de simulação) e um acontecimento que proporciona o fim natural da simulação. Pode ser considerado como sistemas terminais, os serviços de bancos, restaurantes e lojas comerciais. No caso dos sistemas não-terminais, esses não apresetam condições iniciais fixas, e tão pouco, algum acontecimento que defina o fim da simulação. Como exemplos, tem-se os hospitais, os sistemas de comunicação e os sistema que funcionam 24 horas por dia (FREITAS, 2001).

As variáveis inseridas em um modelo de simulação podem apresentar alterações em seus valores, e são modificados das seguintes formas:

- *Continuamente*: Em qualquer posição do tempo, como por exemplo: usina de tratamento de minérios e refinaria de petróleo;
- *Continuamente*: Apenas em posições discretas do tempo, por exemplo: Uma esteira que transporta minério de forma automática e intermitente, e é controlada por uma variável do sistema;
- *Discretamente*: Em qualquer lugar do tempo, por exemplo: Quando as pessoas chegam ao teatro;
- *Discretamente*: penas em lugares discretos do tempo, por exemplo: A realização da simulação financeira.

2.6.2 Simulação estática

O modelo de simulação no estado estacionário atualmente é bem utilizado, e visa a viabilidade econômica dos processos por meio da otimização. Neste caso, é possível realizar uma análise real e eficiente do processo, utilizar na definição de rotas, e dimensionamento dos equipamentos. Na etapa de moagem, os modelos possibilitam fazer algumas alterações nas variáveis operacionais, como por exemplo: percentagem de sólidos e diâmetro ótimo dos corpos moedores. Também é possível na etapa de classificação, alterar o hidrociclone a partir de mudanças nas aberturas do Apex (SASTRY, 1990; DURANCE, 1994).

Dentre a ocorrência da simulação, tem-se o processo direto e a simulação reversa. A simulação direta é empregada para calibrar o modelo e principalmente analisar o processo industrial, também pode fazer a previsão do escoamento de água, minério e outras fases da unidade de beneficiamento. Já o processo da simulação reversa acontece quando o software utilizado se encontra calibrado, e precisamos analisar mudanças no circuito ou de parâmetros operacionais. Na Figura 23 é apresentado o fundamento da simulação estática.

Figura 23 – Fundamentos da simulação estática



Fonte: Santos (2009)

No processo de cominuição, a etapa de moagem pode ser constituída de várias formas e a simulação estática possibilita a escolha do circuito viável. Para isso deve-se tomar como base a taxa de alimentação, as características do material a ser processado e a quantidade a ser produzido, capital a ser investido e outros. Assim, esta ferramenta é direcionada eficientemente para os projetos das unidades de beneficiamento, e gera inúmeros dados, tais como:

- Diversas configurações do circuito de moagem podem ser interpretadas;
- Dimensionamento dos equipamentos de cominuição;
- Em tempo rápido é possível obter uma configuração ideal para a usina de beneficiamento;
- Seleção entre os vários parâmetros operacionais do processo de moagem e alterações em fluxogramas.

2.6.3 Simulação dinâmica

O sistema dinâmico de controle está sendo implementado nas empresas de mineração, visando atender uma melhor recuperação metálica, diminuir os custos operacionais e ampliar as reservas da mineração. Este sistema possui controladores lógicos programáveis (PLCs) que permite buscar as informações de todo o sistema produtivo (MANTILLA; SILVA, 2007).

A utilização e o desenvolvimento deste tipo de simulador está associado as metas estabelecidas pela gestão das empresas. Em sua operação, o mesmo tem a capacidade de auto calibrar-se, a partir dos dados históricos que o próprio sistema vai reunindo enquanto é utilizado (MANTILLA; SILVA, 2007).

É importante e necessário para um bom desempenho do sistema que os analisadores de química e os medidores das variáveis do sistema, tais como: vazão, densidades, nível e outros, estejam funcionando perfeitamente. Este sistema dinâmico apresenta a possibilidade de ser alterado pelo gerenciador do sistema. (MANTILLA; SILVA, 2007).

O direcionamento e aplicação da simulação dinâmica na indústria de bens minerais, tem-se concentrado nos projetos de circuito de controle de processos, circuito alternativo para diminuição do consumo de energia e melhoria da qualidade do produto (ERGUN et al., 2004; JAMSA-JOUNELA et al., 2003; LIU; SPENCER, 2004).

Assim sendo, a simulação dinâmica é considerada uma ferramenta eficiente podendo ser empregada em diversas situações de um projeto de uma planta de beneficiamento, como por exemplo:

- Nas operações unitárias das unidades de beneficiamento é possível realizar o dimensionamento dos equipamentos (britadores, moinhos e circuito de banco de flotação);
- Também é possível dimensionar os equipamentos secundários, como: os tanques, bombas, tubos e válvulas;
- Autenticação do design de projetos (P&ID e PFD);
- Desenvolver estratégias de controle de forma evoluída para os processos;
- Examinar os programas de Controlador Lógico Programável (PLC) e Sistema de Controle Distribuído (DCS).

Antes da edificação e do pleno funcionamento da usina de beneficiamento algumas das aplicações mencionadas acima podem ser desenvolvidas. Ao empregar a simulação após a usina entrar em operação é possível propor vários cenários de testes. Essas possibilidades permitem visualizar as melhores opções de processamento e diminuir os riscos de paradas dos equipamentos e produção.

2.6.4 Simulação computacional

De acordo com Pegden *et al.* (1995) temos as seguintes vantagens:

- Depois de gerado, o modelo tem a possibilidade de ser empregado várias vezes para analisar os projetos e as políticas sugeridas;
- Os procedimentos de avaliação da simulação proporciona a análise de um sistema proposto, ainda que as informações de entrada sejam “rascunhos”.
- Em relação aos métodos analíticos, normalmente a simulação é mais prática;
- No processo de simulação não é preciso muitas simplificações na avaliação de alguma medida concebível. Porém, os modelos analíticos necessitam de uma alta quantidade de simplificações, para poder matematicamente trata-los;
- Os modelos de simulação apresentam um nível de detalhamento bem próximo dos sistemas reais. E neste caso, é possível avaliar os procedimentos operacionais, fluxos de informações, regras de decisões, e demais, sem precisar intervir no sistema real;
- Alguns fenômenos podem ser analisados, visando o entendimento de como e por que ocorrem;
- Para melhor estudar os fenômenos é possível controlar o tempo, podendo ser diminuído ou aumentado, possibilitando refazer os fenômenos de forma mais lenta ou rápida;
- Entender de forma mais eficiente as variáveis mais interessante para um bom desempenho, e verificar a interação entre elas e os demais elementos do sistema;
- Mapear problemas operacionais de diversos sistemas, por exemplo: fluxos de materiais, produtos e informações. Sendo esses auxiliados através do apoio visual;
- O trabalho do processo de simulação permite apresentar de forma clara como um sistema realmente opera, em discordância a maneira como todos acham que o mesmo opera;

Em uma pesquisa realizada com cerca de 65 empresas no Reino Unido, onde as mesma utilizavam o processo de simulação, é apresentado vários benefícios (Tabela 5) adquiridos através do emprego da respectiva técnica (CASSEL, 1996).

Benefícios	Empresas (%)
Redução de risco	80
Melhor entendimento	75
Redução dos custos operacionais	72
Redução do tempo em processo	72
Mudanças mais rápidas da planta	52
Redução dos custos de capital	48

Fonte: Hollocks (1992)

A utilização da simulação é considerada importante e já foi empregada em diversas empresas. A empresa Northern Research and Engineering Corp, obteve economia da ordem de US\$750.000,00 e a Exxon em torno de US\$1,4 milhões (CASSEL, 1996).

De acordo com Saliby (18989) os principais motivos da utilização da técnica de simulação, estão descritos a seguir:

Maior disponibilidade de recursos computacionais:

À medida que o tempo passa, são desenvolvidas novas tecnologias de informática direcionadas ao processo de simulação;

Modelos mais realistas:

Esta técnica não direciona o enquadramento de um problema para um certo formato, é o que acontece com a programação linear. Neste caso, ao invés de soluções precisas para resolução de problemas aproximados, teremos para a resolução de problemas reais, as soluções aproximadas;

Soluções rápidas:

Atualmente as empresas apresentam um ambiente dinâmico e agitado, e necessitam de respostas ágeis ao invés de respostas lentas.

Processo de modelagem evolutivo:

Ao empregar o processo de simulação é possível realizar diversas combinações e melhorar a eficiência do sistema, demonstrando que não é uma técnica estagnada;

Facilidade de comunicação:

Compreender um agrupamento de diversas equações matemáticas é bem mais complicado, do que a simulação. Por exemplo: Hoje já dispomos de simulação visual, onde podemos observar as descrições dos processos por meio de vídeos;

Problemas mal estruturados:

Pode ser utilizado para esse tipo de demanda, porém os resultados obtidos da simulação devem ser vistos de forma cautelosa.

Baseado em Cassel (1996) a simulação tem as seguintes desvantagens:

- Como a natureza da simulação é estocástica, tem-se a necessidade que os modelos de simulação rodem inúmeras vezes, para termos uma boa previsão do funcionamento do sistema;
- Geralmente apresentam um custo elevado e demandam tempo para ser implementados e descritos;
- Está atrelada a validade do modelo elaborado;
- Para a resolução do problema a simulação não apresenta uma resposta ótima, mas sim várias alternativas a partir dos ensaios realizados.

2.6.5 Formas para conduzir a simulação computacional

Existem alguns elementos que são importantes para um bom desenvolvimento de um projeto de simulação, e esses são divididos em classe técnica, classe gerencial e classe de precisão de dados (LAW; MCCOMAS, 1992).

Classe técnica:

- Ter conhecimento da técnica de simulação a ser usada, da teoria das probabilidades e estatísticas, e dos padrões estocásticos de pesquisa operacional;
- A aleatoriedade do sistema deve ser delineada de forma razoável;
- Utilizar métodos estatísticos adequados para analisar as informações de entrada e saída do processo de simulação;
- Selecionar o software apropriado e usar de forma correta para o processo de simulação.

Classe Geral:

- Elaborar a problemática de forma correta;
- Utilizar procedimentos de coordenação de projetos.

Classe de Precisão dos Dados:

- Adquirir dados confiáveis em relação as formas de operação do sistema e da lógica de controle;
- Determinar a validade e confiabilidade do modelo.

Existe uma estrutura para conduzir as diversas fases do trabalho (LAW; KELTON, 1991). A seguir será descrito cada fase a ser considerada.

Formulação do problema e planejamento do estudo:

Para a realização de uma pesquisa é fundamental a determinação do objetivo principal e das áreas específicas que serão analisadas. Nessa fase também é possível determinar as escolhas que serão ensaiadas e as suposições a serem assumidas.

Coleta de dados e formulação do modelo conceitual:

Todas as ideias e conhecimentos precisam ser reunidos e empregados para explicar os procedimentos operacionais, e também determinar as posições das variáveis usadas no modelo.

Validade:

É preciso que os envolvidos no trabalho se comuniquem com as pessoas que tenham conhecimento do processo, para que seja possível analisar se o modelo é apropriado em relação as informações coletadas e aos conceitos.

Construção de um programa computacional e verificação:

Esta fase corresponde a selecionar o software de simulação e em seguida transformar o modelo teórico em programa computacional. A definição de qual software a ser usado, estará associado a sua finalidade, e estando tudo certo com o programa, apenas verifica-se se existe algum erro.

Replicação piloto:

Os circuitos piloto são fundamentais para autenticar o programa na etapa posterior.

Validação:

A etapa de validação é utilizada para verificar se os ensaios pilotos tem apresentado, dados em sua saída que representem o sistema real.

Planejamento do experimento:

O processo de simulação apresenta natureza estocástica e faz a determinação do comportamento do sistema em relação a alguns critérios. Dentro desse processo é fundamental definir o período de tempo, para termos as variáveis em condições adequadas e realizar a simulação naquele dado momento.

Realizar ensaios produtivos:

Ao considerar as variáveis definidas em fase anterior, realiza-se os ensaios visando identificar os resultados dos cenários escolhidos.

Análise dos dados de saída:

Procedimentos estatísticos são empregados para interpretar as informações de saída. Quando se tem diversas alternativas, dá-se preferência a melhor opção.

Documentação, apresentação e implementação:

É importante documentar todo o projeto de simulação, devido a necessidade de ser reutilizado. O sucesso do estudo está associado a sua apresentação e realização.

2.6.6 Utilização da simulação na mineração

A seguir é apresentado uma série de aplicações importantes da simulação na mineração (STURGUL, 1997).

No ano de 1961:

- Rist desenvolveu um modelo com a pretensão de definir a quantidade ótima de trens para o transporte de minério em uma mina subterrânea. E nesse caso foi empregado as técnicas de Monte Carlo.

No ano de 1965:

- Sanford elaborou uma dissertação de mestrado abordando o tema sobre simulação de correias transportadoras.

- Calder e Waring expõe argumentos relacionados a um pacote computacional de simulação, direcionado a mina de Carol situada no Canadá.

No ano de 1969:

- Suboleski e Lucas conseguem produzir o programa Simulador 1, que é capaz de realizar simulações de operações em minas subterrâneas que trabalham com o método de lavra de câmaras e pilares.

No ano de 1973:

- Bauer e Calder apresentam as vantagens da utilização de GPSS na simulação de operações na lavra de minas a céu aberto.

No ano de 1982:

- Steiker empregou de forma semelhante a Bauer e Calder o GPSS/H (software) na simulação de sistemas de transporte nas minas subterrâneas.

No ano de 1989:

- Sturgul e Harrison utilizam o GPSS/H para realizar a simulação de operação de uma lavra de minério, visando definir o método de lavra e os equipamentos.

No ano de 1976:

- Wilke et. al., apresentam a elaboração de um estudo de simulação para definir melhorias no carregamento e transporte de minérios por trem, ao utilizar o critério de despacho.

No ano de 1984:

- White e Jones mencionam a utilização da simulação com objetivo de melhorar as atividades operacionais dos caminhões e escavadeiras na mineração a céu aberto, mina de ferro em Itabira/MG.

No ano de 1992:

- Lanna et. al., elaboraram um modelo de simulação com a proposta de realizar o dimensionamento da frota de caminhões da mineração, SAMA em Goiás.

- Faria descreve sobre um modelo de simulação para ser empregado na análise de transporte por caminhões e definição do custo adicional para as operações de blendagem, empresa Ferteco Mineração em Minas Gerais.

No ano de 1996:

- Sturgul e Tecsma empregaram simulação e animação para prevê a eficiência de produção com diversas combinações de carregadeiras e caminhões em sistema de despacho, mineração a céu aberto em Minnesota-EUA.

No ano de 1997:

- Vargas elaborou um modelo de simulação discreta visando compreender a possibilidade de ser viável ou não a instalação da pilha de homogeneização no empreendimento mineração de níquel de Minorco's, situado na Venezuela.

- Bazante estabeleceu um modelo para analisar a eficiência do sistema escavadeira e caminhões na empresa SAMA, em Goiás.

No ano de 1999:

- Runciman et. al., Demonstraram a utilização das técnicas de simulação Witness pelo Lanner Group e Auto Mod pelo Autosimulations Inc., nos Estados Unidos.

No ano de 1995:

- Pinto menciona a utilização do SIMUL na elaboração de um modelo de simulação para perfuração em uma mina, empresa Minerações Brasileiras Reunidas (MBR).

No ano de 1997:

- Carvalho e Duarte através do simulador Nordberg analisaram diversas opções visando a operação a seco da planta de britagem e peneiramento da Samarco Mineração S.A. No momento a usina está trabalhando conforme os ensaios de simulação.

No ano de 2007:

- Ceciliano descreve em seu trabalho de dissertação a utilização da simulação para a otimização na cadeia produtiva de minérios de ferro da Samarco Mineração S/A.

No ano de 2009:

- Bergerman menciona em sua pesquisa de dissertação que o emprego da simulação permite realizar a análise detalhada de diversas opções de fluxograma e condições operacionais.

No ano de 2013:

- Bergerman cita em sua Tese a possibilidade do uso da simulação para simular o consumo de energia e a distribuição granulométrica dos moinhos verticais.

No ano de 2019:

- Magalhães emprega a técnica de simulação para implementar um simulador por meio de um modelo matemático do processo de espessamento contínuo e projetar controladores para esse processo.

2.6.7 Simulação em tratamento de minérios

O emprego da simulação no beneficiamento de minérios está apoiada nos modelos empíricos, fenomenológico e mecanicista. Essas ferramentas estão disponíveis no mercado para os profissionais de diversas áreas. A utilização da simulação permite a análise rápida e eficiente dos processos, tais como: alterações no fluxograma, variáveis operacionais dos equipamentos das usinas e otimização do processo (MARTINS, 1997).

É importante mencionar que a simulação fundamentada no modelos citados e independente que exista ou não o fator tempo, é classificada em dinâmica ou estática. O processo de simulação é considerado uma excelente ferramenta a ser empregada no ensino, aprendizagem e treinamento, e apresenta as seguintes características: oferece uma estrutura formal, qualitativa e quantitativa para entendimento do processo; oferece uma excelente base de dados para as atividades de planejamento e avaliação de testes de laboratório, usina piloto, ou circuitos existentes, para determinação de parâmetros de processo e critérios de scale – up e definição de estratégias de controle, e elevado nível de análise dos processos, diminuição dos custos de operação e controle, ágil nas definições dos fluxogramas, e permite a otimização todo o processo.

O processo de simulação em parceria com os dados laboratoriais e principalmente com as informações dos ensaios piloto, são fundamentais para confiabilidade da validação dos resultados fornecidos pelos softwares de mineração. Vale ressaltar que esse processo de simulação possibilita trabalhar com vários cenários e fornecer respostas rápidas (MARTINS, 1997). A seguir é apresentado os diversos campos de utilização da tecnologia citada e algumas de suas vantagens.

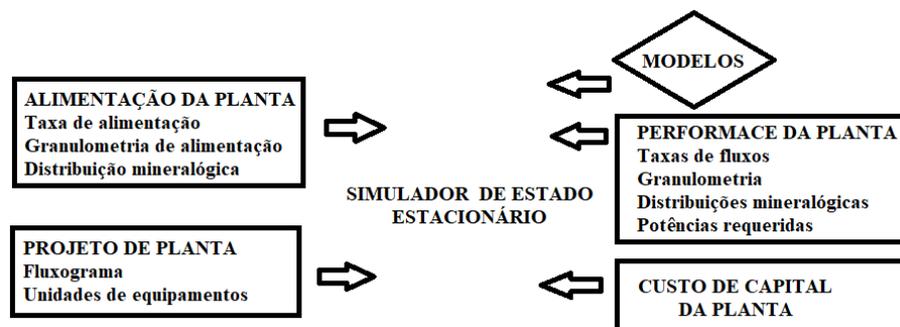
- Realizar investigações sobre as modificações nos fluxogramas e variáveis operacionais, e não precisar paralisar a linha de produção;
- Desenvolvimento de projetos de expansão e dimensionamento de novas plantas de beneficiamento;
- Na definição de escolhas ou tomada de decisão, sendo a base sólida e formal;
- Possibilita fazer análises das variáveis do processo e estudar sistematicamente as operações;
- A ferramenta permite ganhos elevados em termos de tempo e recursos, demonstrando sua agilidade;
- Permite economizar recursos e tempo, pois podemos organizar e planejar os ensaios de laboratório e principalmente da usina piloto;

- No início das atividades dos projetos e das operações é possível mapear e identificar os problemas;
- É possível melhorar consideravelmente o desempenho da usina de beneficiamento, buscando a otimização do processo, através da diminuição dos custos operacionais e aumento dos recursos.

2.6.8 Software Usim Pac 3.2

Em uma planta de beneficiamento de minérios é empregado a modelagem de processos e a simulação em várias etapas, tais como: desenvolvimento do processo até reabilitação do local, estudos de viabilidade, e operação da planta, desde o dimensionamento até a entrega. Os trabalhos iniciais sobre a discussão do processo de simulação é referente a funcionalidade e a performance da planta a ser desenvolvida. Esses trabalhos são eficientes ao utilizar os conhecimentos obtidos em testes de laboratório, planta piloto e dados da operação da usina (CASPEO, 2006). Quando se trata de simulação, o mesmo apresenta os devidos elementos (Figura 24).

Figura 24 - Principais funcionalidades de um simulador de estado estacionário



Fonte: CASPEO (2006)

Fluxograma:

Representa o processo em relação as operações unitárias sucessivas e fluxos de materiais. O fluxograma permite reproduzir os diversos cenários projetados, com várias características da planta pesquisada, como por exemplo: distribuição de reagentes, reciclagem de água ou tratamento de resíduos.

Definição de fase:

Descreve os materiais beneficiados na usina (matéria – prima, produtos, reagentes, água, resíduos), visando as operações unitárias, a eficiência da planta, e a caracterização dos resíduos em relação ao impacto ambiental, sendo todos possíveis de serem avaliados.

Modelo Matemático:

Para cada operação unitária se faz necessário um modelo matemático. O modelo representa as informações científicas da operação unitária, e sua complexidade está associada ao que se deseja e aos dados disponíveis (criação de fluxograma e dimensionamento ou otimização da operação unitária). É importante ressaltar que os parâmetros do modelo (dimensões, configurações e fatores de calibração) são validados através dos dados de campo.

Conjunto de Algoritmos:

É empregado para a reconciliação de dados, calibração de modelos, dimensionamento da operação unitária, cálculo do balanço de massa completo, consumo de energia e cálculo do custo de capital. Os algoritmos utilizados estão ajustados a um conjunto de ferramentas de demonstração de dados.

O processo de simulação na indústria mineral é vista como uma modelagem computacional de um sistema operacional de uma atividade minerária efetiva. Neste caso, possibilita as indústrias a realizarem os ensaios de seus processos de forma virtual, podendo analisar diversos cenários e conseqüentemente diminuir os custos.

O software Usim Pac tem sido trabalhado desde os anos de 1986 pela BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières), que representa a principal instituição pública da França, que atua na área das Ciências da Terra com foco no gerenciamento de recursos minerais da superfície e sub – superfície (BRGM, 2022, on-line).

O Usim Pac é representado por uma plataforma de software capaz de realizar simulações e modelar processos industriais. É uma ferramenta que fornece aos profissionais da área de tratamento de minérios, a possibilidade de fazer ensaios industriais e piloto de uma maneira segura e rápida. Também é possível diminuir os custos e aumentar a capacidade de produção das plantas de beneficiamento (CASPEO, 2019, on-line).

Esse software serve de base para tomada de decisões em relação às análises econômicas, técnicas e ambientais. Tem aplicação em várias etapas da existência de uma unidade de beneficiamento. Entre as diversas aplicações, tem-se: verificação de cenários, investigação da atuação das linhas de produção, verificação de gargalos, determinação de balanços de material, água e energia, dimensionamento de equipamentos e otimização das configurações, entre outros.

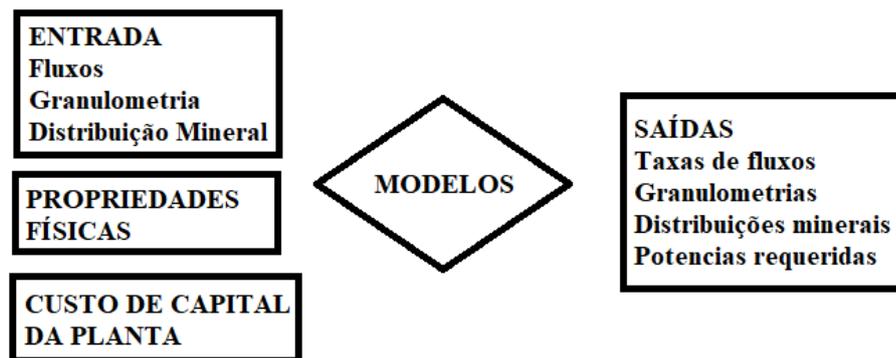
Através deste software é possível fazer simulação, reconciliação de dados, balanço de massa, fluxograma, dimensionamento de equipamentos, cálculos econômicos e ambientais e otimização de processos. Ele também permite modelar em uma plataforma quase todas as operações da mina à usina, como por exemplo: britagem, moagem, gravidade e separação magnética, flotação, lixiviação e concentração (CASPEO, 2019, on-line).

Essa ferramenta contribui para o aperfeiçoamento do projeto de processo, dimensionamento da planta e otimização do processo. Desta forma, assegura uma escala branda do laboratório ao piloto e da escala piloto para a industrial.

O software não é específico para prever e otimizar plantas de beneficiamento, com ele é possível fazer balanceamento, modelar, simular processos em batelada ou contínuos em uma única interface. Também possibilita aos profissionais da área de tratamento de minérios: Operações de planta modelo usando dados experimentais disponíveis, determinar a configuração ideal da planta que atenda às metas de produção, e operações unitárias de tamanho necessárias para alcançar determinados objetivos de circuito.

Inúmeros modelos matemáticos estão vinculados para cada uma das operações descritas no fluxograma. Esses modelos determinam as informações de saída através dos dados de entradas e das variáveis do modelo (Figura 25).

Figura 25 – Modelos de operações unitárias



Fonte: CASPEO (2006)

A ferramenta Usim Pac utiliza modelos matemáticos e são classificados em níveis:

Nível 0:

Possibilita ao técnico especificar claramente o rendimento das unidades. Neste caso, pode ser citado a atuação da unidade de classificação, onde ocorre a modulação através de uma curva de partição, que especifica o by-pass, a inclinação e a malha de corte (d50). Na execução da simulação, a eficiência da usina não está atrelada as suas dimensões e as vazões de alimentação de minério.

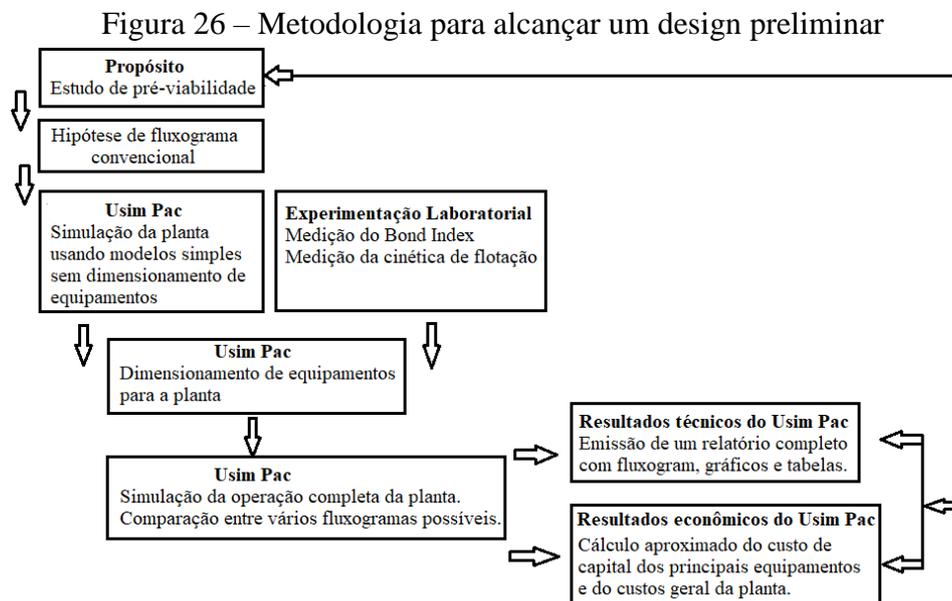
Nível 1:

Para esse nível deve ser considerado os parâmetros dimensionais. Nessa situação não é necessários muitas informações experimentais. Por exemplo, ao usar o modelo de moinho de bolas, é empregado como parâmetro experimental somente o Índice de Trabalho de Bond.

Nível 2 e Nível 3:

Esses são considerados de níveis mais elevados e também são mais confiáveis, porém demandam do conhecimento de vários parâmetros. Os dados necessários podem ser obtidos através da operação contínua da unidade (nível 2) ou por informações vindas de ensaios específicos de laboratório (nível 3).

Na Figura 26 é apresentado as formas de se trabalhar no Usim Pac. Os trabalhos são desenvolvidos em cinco (05) procedimentos, nos quais, um e dois referem-se ao funcionamento da planta. O terceiro (03) procedimento é realizado para definir os equipamentos com condições de atender as metas de eficiência estabelecida nas etapas anteriores. A quarta (04) e quinta (05) maneira de abordagem são destinadas a produção de dados para elaboração do estudo prévio de viabilidade (CASPEO, 2006).



Fonte: CASPEO (2006)

A metodologia utilizada no software é descrito a seguir:

Fase 01:

Inicialmente deve-se ilustrar o fluxograma da planta. O software Usim Pac dispõe da ferramenta *Flowsheet Drawing* que tem a capacidade de realizar o desenho ou modificar o fluxograma. A geração dos fluxogramas não representa apenas desenhos, os mesmos são interpretados e se o fluxograma criado não for entendido, mensagens de erro são mostradas.

Fase 02:

Em seguida é necessário determinar o desempenho para cada operação unitária. Para realizar esse procedimento, é fundamental o conhecimento do operador do software. Nesse caso, o projetista da planta indica alguns objetivos através do modelo nível 0. O software possui a ferramenta *Equipment Description* que permite fazer a seleção do modelos e dos parâmetros

de cada operação unitária. O modelo nível 0 possibilita obter as informações sobre os cálculos de vazões e distribuições de tamanho de partículas em todos os fluxos do circuito.

Fase 03:

Nessa etapa é realizado o Design das unidades de equipamento. Para a realização desse procedimento é utilizado a ferramenta *Equipment Description*, com o objetivo de inserir os modelos nível 1 e 2, e conseqüentemente descrever as características de certos equipamentos.

Fase 04 e 05:

Representa a última fase, onde é possível através da ferramenta *Direct Simulation* verificar o custo estimado de capital para cada cenário da simulação. Também é possível determinar o custo de capital aproximado da planta, por meio da ferramenta *Investment Capital Cost Estimation*. Neste caso é gerado um relatório de custos, e nele está inserido: A relação dos custos das principais unidades de equipamentos, custo de aquisição total do equipamento, excluindo transporte e instalação e uma tabela com várias relações que são aplicadas a este custo de compra para fornecer uma repartição orçamental do investimento total da planta.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Na realização dos ensaios (Figura 27) desta pesquisa utilizou-se o Laboratório de Tecnologia Mineral – LTM, pertencente a UFPE, o Centro de Tecnologia Mineral – CETEM do Rio de Janeiro, o Laboratório de Caracterização de Engenharia de Materiais – UFCG e Laboratório de Tratamento de Minérios da UFCG.

Figura 27 – Fluxograma dos ensaios realizados



Fonte: Autoria própria (2023)

As atividades experimentais (Tabela 6) foram desenvolvidas em três etapas: Na primeira fase foram realizados os ensaios físicos, tais como: Densidade e Work Index (WI). A segunda fase consistiu na caracterização do minério, por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV, e das análises de Difração de Raios – DRX e Fluorescência de Raios – FRX. A terceira etapa os ensaios de moagem em laboratório e em seguida o processo de simulação com a utilização do software Usim Pac.

O processo de moagem de pegmatitos a ser estudada e otimizada por simulação é referente ao moinho de seixos, pertencente a empresa de mineração Florentino.

Tabela 6 - Resumo das etapas e ensaios realizados nesse trabalho

Etapas	Ensaio
Ensaio Físicos	Densidade Relativa do Minério Análise Granulométrica (F ₈₀ , P ₈₀) Determinação do Work Index (WI)

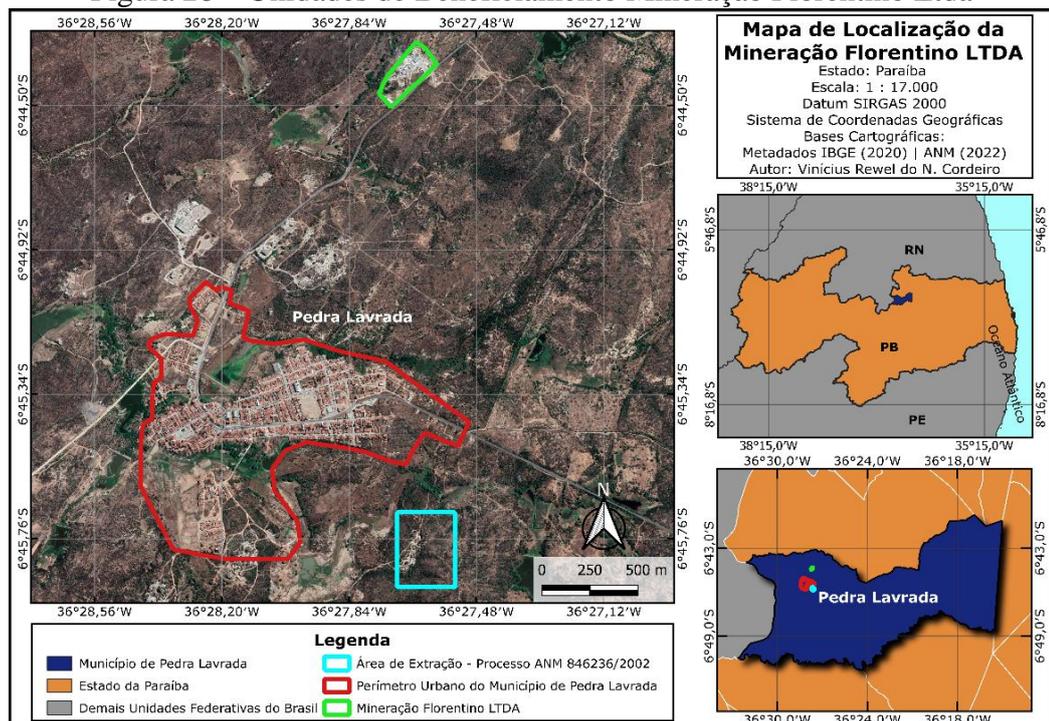
Caracterização	Difração de Raios – X (DRX) Fluorescência de Raios – X (FRX) Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)
Ensaio de Beneficiamento	Britagem Britagem/Moagem
Processo de Otimização	Análise Granulométrica (P ₈₀) Moinho de Seixos (Método de Bond)
Simulação	Software Usim Pac

Fonte: Autoria própria (2022)

3.1 COLETA E PREPARAÇÃO DE AMOSTRA

O pegmatito Alto Dois Irmãos está localizado próximo ao município de Pedra Lavrada – PB, apresentando coordenadas geográficas $S06^{\circ}45'47.39''$ e $W36^{\circ}27'39.87''$, e distante 100,0 km de Campina Grande – PB. Esse alto é (ressaltos topográficos que apresentam resistência a erosão, e estão localizados nos pegmatitos heterogêneos) explorado por garimpeiros, e é o fornecedor de minério para a Unidade de Beneficiamento Florentino Ltda (Figura 28).

Figura 28 – Unidades de Beneficiamento Mineração Florentino Ltda



Fonte: Autoria própria (2022)

O procedimento adotado para realizar a amostragem (retirada de uma certa quantidade de material de um todo que se pretende amostrar), com o objetivo de compor a amostra primária, é fundamental para o controle do processo e comercialização do minério da unidade de beneficiamento.

Tendo conhecimento da importância deste procedimento de amostragem, foi feito um planejamento com a pretensão de garantir informações confiáveis e suficientes para a pesquisa. Neste caso tivemos a companhia do senhor Antônio, encarregado do setor de moagem, que ajudou a coletar o material e cumprir as normas de segurança.

Nesse caso, o planejamento ocorreu da seguinte forma: as amostras coletadas foram provenientes do circuito de cominuição e do garimpo Alto Dois Irmãos – PB. O material obtido no garimpo, possui um tamanho médio de aproximadamente 300,0 mm. Enquanto que as amostras do circuito, tem tamanho entre 60,0 mm e 15,0 mm.

Foram coletadas o máximo de informações possíveis da unidade de beneficiamento, pois, é fundamental para a interpretação de possíveis erros. Nesse caso, vamos considerar a média dos registros operacionais. Para amenizar a questão de flutuação no processo, foi estabelecido um intervalo de pelo menos uma hora, antes da realização da amostragem. Essa consideração é importante para garantir que o circuito esteja nas condições operacionais adequadas.

É importante ressaltar que todos os procedimentos foram feitos de forma simultânea, durante a realização de coleta das amostras. Também é preciso observar a possibilidade de perturbações durante o processo de amostragem, e nessa situação é sugerido o descarte. No caso, do material coletado no alimentador da britagem primária, foi possível ser realizado de forma manual, a coleta desses fragmentos permitirá identificar a granulometria da alimentação do circuito de cominuição. Após a britagem secundária, foi coletado o material que estava sob a correia transportadora que tem a função de alimentar o moinho de seixos.

Na unidade de beneficiamento existe uma pilha de homogeneização, visando a regularização ou homogeneização das características do material para a alimentação do circuito. Nesse sentido, a coleta das amostras foram realizadas em intervalos de 15 min, até completar um período de 1 (uma) hora.

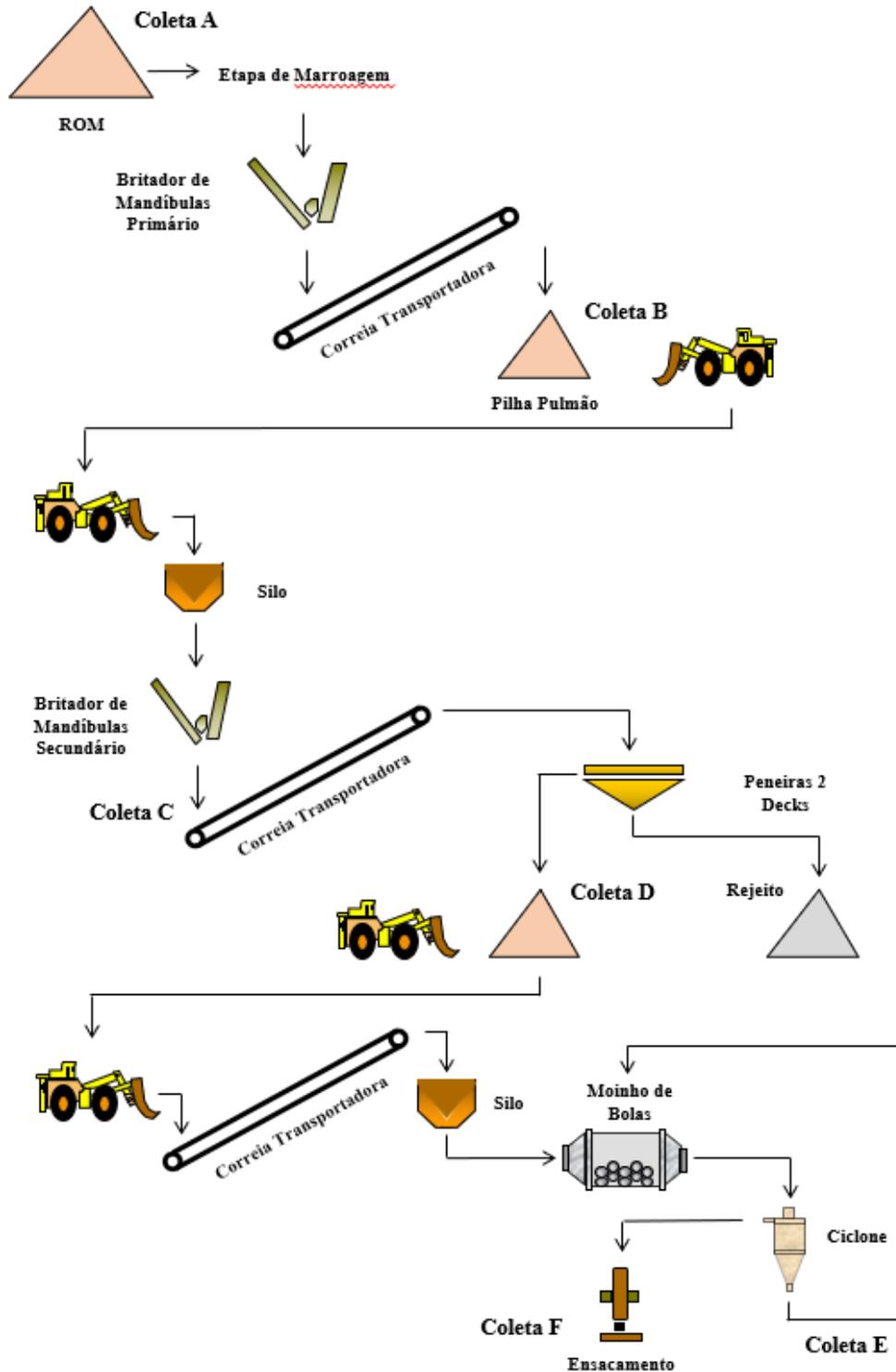
De acordo com as normas de segurança, e considerando que os equipamentos apresentam grades de proteção, as amostras foram obtidas seguindo algumas recomendações. Para as amostras em correias transportadoras, foi realizado um bloqueio do equipamento. Esse procedimento de parada e bloqueio de segurança, normalmente são demorados, e por isso, a coleta foi realizada de uma única vez. Também é importante observar se o local de obtenção das amostras, possui espaço suficiente para a pessoa fazer a coleta e manusear o material.

Considerando que os equipamentos, como britadores de mandíbulas, peneiras e o moinho de seixos, que fazem parte do processo de cominuição da unidade de beneficiamento estudada, apresentam riscos de acidente durante seu funcionamento, é de fundamental importância que estejam protegidos por grades de proteção. Diante disso, o processo de coleta das amostras requereu alguns cuidados, entre os quais: atenção ao acesso à zona de perigo, aos pontos de esmagamento, e principalmente a existência de arestas cortantes ou outras saliências perigosas.

A amostragem do material foi realizada no circuito de beneficiamento de pegmatitos da Mineração Florentino Ltda. sete pontos de coleta foram definidos e foi coletado em média 20,0 kg de material em cada ponto, totalizando 140,0 kg. As amostras foram coletas na alimentação do circuito de cominuição (A), na descarga da britagem primária (B), na descarga da britagem secundária (C), na alimentação do moinho de seixos (D), na descarga do moinho de seixos (E),

na carga circulante (underflow do ciclone pneumático) (F) e no produto final (overflow do ciclone pneumático) (G), conforme apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Pontos de coleta de material no beneficiamento de pegmatitos da Mineração Florentino Ltda



Fonte: Autoria própria (2022)

O processo de amostragem ocorreu sob orientação de um colaborador experiente, que tem a função de realizar a coleta, e orientar a todos sobre os procedimentos de segurança durante o processo. As ferramentas utilizadas foram os amostradores de corte, com abertura suficiente para tentar minimizar os erros de amostragem.

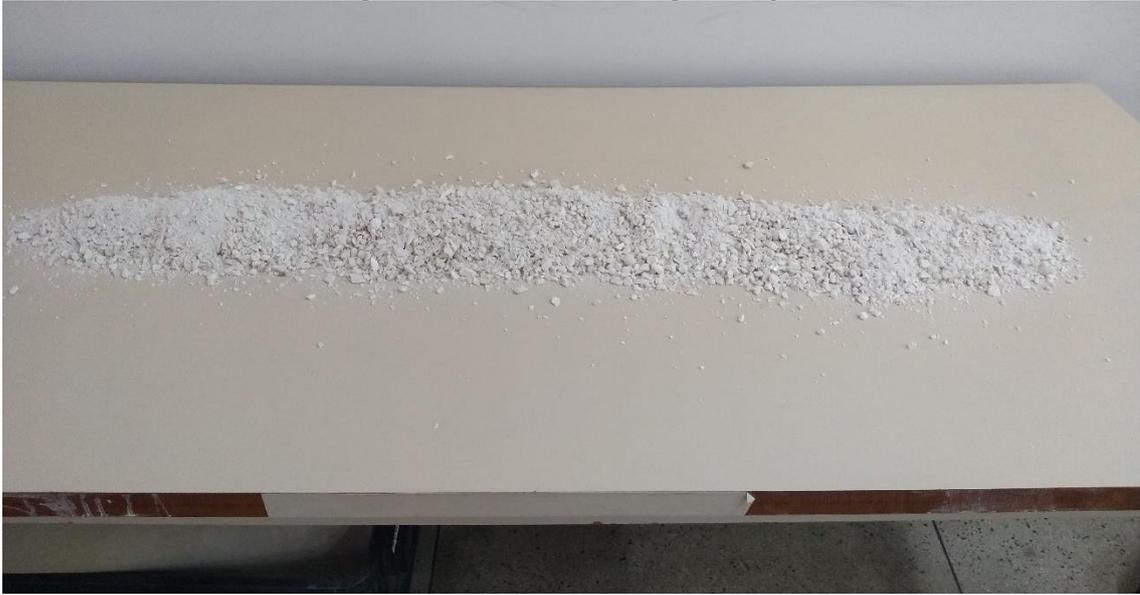
Baseados na ABNT (2003), foram utilizados dois tipos de amostradores. O primeiro amostrador foi empregado para coletar o material da britagem primária e secundária (15,0 mm), e possui um cabo de tamanho médio, e dimensões de 100 x 100 x 100 mm. Enquanto, o segundo amostrador, apresenta um cabo longo e dimensões de 50 x 50 x 50 mm, e foi utilizado na coleta de material do processo de moagem (0,074 mm).

A retirada das amostras se deu em um período mínimo de uma hora entre a entrada em operação dos equipamentos e a coleta, permitindo que o processo de cominuição mantivesse em regime no momento da condição amostrada. Também foi feita uma visita ao Garimpo Alto Dois Irmãos - PB, onde foram coletadas amostras nas frentes de lavra. Esse material foi condicionado em 02 sacos de 50,0 Kg, etiquetados e pesados, para a realização de ensaios em laboratório.

Após a etapa de coleta, as amostras passaram por um processo de preparação, onde ocorreu a redução granulométrica através de um britador de mandíbulas de escala laboratorial, e em seguida realizou-se a homogeneização e quarteamo, com a finalidade de obter material com massa e granulometria adequadas a ser usado nos ensaios de moagem e caracterização.

Ao utilizar as técnicas de cone e pilha de amostragem, foi possível obter subamostras da amostra principal, para serem utilizadas nos ensaios de moagem e caracterização. As primeiras atividades realizadas no laboratório foi fazer a mistura para garantir a sua homogeneidade (Figura 30), e depois fazer a construção do cone. Em seguida, o cone foi dividido em quatro partes iguais, e as diametralmente opostas foram tomadas como amostra final, conforme o planejado (Figura 31).

Figura 30 - Pilha de homogeneização



Fonte: A autoria própria (2022)

Figura 31 – Coleta de amostra por cone de amostragem



Fonte: A autoria própria (2022)

Em um outro momento dos trabalhos, foi empregado o quarteador Jones (Figura 32) para redução do volume das amostras. Esse equipamento permitiu quartear a amostra em duas partes, até obter a alíquota na quantidade desejada.

Figura 32 – Quarteador Jones



Fonte: A autoria própria (2022)

Ao término das atividades de homogeneização e quarteamento, foram preparadas 40 amostras de aproximadamente 1,0 kg cada. Dessas amostras, foram retiradas alíquotas para serem moídas em um pulverizador do tipo CT – 12241 (Servitech), até a granulometria $< 0,074$ mm. Após essa etapa, uma parte das amostras foram encaminhadas para os ensaios de caracterização mineralógica e morfológica DRF, FRX, MEV. E uma outra parte foram britadas a uma granulometria $< 3,5$ mm para a determinação do *Work Index* (WI).

3.2 ENSAIOS FÍSICOS

Nesta fase, as atividades foram concentradas com objetivo de definir algumas propriedades físicas fundamentais para a moagem do minério Pegmatítico do Alto Dois Irmãos-PB. Os ensaios realizados foram: densidade relativa do minério, ensaios de granulometria, determinação do work index (WI).

O minério de diferentes frentes do garimpo, as características mineralógicas, químicas e granulométricas, apresentam informações fundamentais que levam a grandes diferenças na capacidade de produção dos moinhos de seixos das unidades de beneficiamento da região pegmatíticas da borborema. Sendo assim é importante identificar a quantidade de energia que os minérios vão demandar para alcançar uma determinada faixa de tamanho.

Para a realização dos ensaios descritos foram empregadas as amostras coletadas no circuito de beneficiamento, porém, também foi coletado material no Garimpo Alto Dois Irmãos – PB.

3.2.1 Densidade relativa do minério

Picnometria a gás

Para determinar a densidade do minério dessa pesquisa foram feitos ensaios em 03 amostras (A, D e F) das sete (07) coletadas no circuito de cominuição e utilizado a técnica da picnometria com o gás hélio. Utilizou-se taxa de equilíbrio de 0.200 psig/min, temperatura aproximada de 25°C e duas purgas. Os ensaios foram realizados no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), no Rio de Janeiro e foi utilizado um equipamento da marca Micromeritics, modelo Accupyc 1340 (Figura 33).

Figura 33 – Picnômetro a gás modelo Accupyc 1340



Fonte: CETEM

O procedimento para determinar a densidade, consiste em pesar a amostra em uma balança analítica, posteriormente medir o volume real da amostra e calcular a massa específica do material. O volume do sólido é definido, por meio da adsorção gasosa do gás hélio inerte à superfície do sólido.

3.2.2 Análise granulométrica

O ensaio de granulometria foi realizado a partir das amostras coletadas no circuito de beneficiamento, e foram analisadas aproximadamente 20,0 kg de material. Essa análise

granulométrica permitiu determinar as porcentagens das partículas em função de sua granulometria. Na execução das atividades foram considerados o peso da amostra empregada, o tempo de peneiramento, e principalmente a precisão na condução dos ensaios a seco.

A amostra que é considerada resíduo na etapa de extração passou por uma série de peneiras colocadas, no sentido de maior diâmetro para o menor diâmetro, sendo esta última peneira a de 0,147 mm (malha 100). Na realização dos ensaios, foram usadas 07 peneiras em cada procedimento do peneiramento. Esse equipamento, denominado de agitador eletromagnético de peneiras, apresenta vibrações programáveis, uma tampa e o fundo, e tem capacidade para operar com diversas peneiras. O funcionamento desta máquina permite a realização da análise de materiais de granulometrias variadas (6,68 mm até 0,074 mm). Desta forma, foram feitos alguns ensaios de peneiramento para determinar a distribuição granulométrica do material coletado no circuito de cominuição da Mineração Antônio Florentino Ltda.

A amostra analisada foi proveniente do material coletado no circuito da unidade de beneficiamento, após submetido à amostragem e homogeneização. Utilizou-se nos ensaios os seguintes materiais e equipamentos: série Tyler de peneiras: 1, 4, 10, 16, 30, 50, e 100 malhas, rotap de peneiras, balança *top loader* digital, e sacos plásticos. Enquanto aos procedimentos adotados foram: as peneiras selecionadas foram colocadas no *rotap*, e o peneiramento a seco foi realizado, pesando-se a amostra, usando um tempo de peneiramento do *Rotap* de 15 min, e posteriormente o material retido em cada peneira foi pesado, etiquetado e armazenado em sacos plásticos.

3.2.3 Determinação do índice de trabalho (WI)

O índice de moabilidade ou de trabalho (WI) é definido como um parâmetro que representa a resistência do material à cominuição. Do ponto de vista numérico é expresso pelo trabalho necessário (kWh), para moagem de uma tonelada curta (short ton, st = 907 kg) do minério pesquisado, desde o tamanho infinito (∞), até o tamanho final de um d_{80} de 100 μm (LUZ *et. al.*, 2010).

Desenvolveu-se vários índices de trabalho, como WI de impacto; WI para moinho de barras e WI para moinho de bolas. Mas para o desenvolvimento deste trabalho será usado o WI para o moinho de bolas. O ensaio de moagem empregado para determinar o índice de trabalho do minério pesquisado, é realizado em equipamentos e testes padronizados.

3.2.3.1 Determinação do WI para moinhos de bolas

Para realização do teste é usado um moinho de bolas padrão (Figura 34), que opera em moagem a seco, com velocidade de rotação de 70 rpm, correspondendo a 91,4% da velocidade crítica do moinho, de acordo com ABNT – NBR 11376. Este equipamento apresenta medidas de 305 x 305 mm (diâmetro por comprimento), com extremidades arredondadas, revestimento liso, contador de giros e comando automático de parada.

Figura 34 – Representação do moinho de bolas usado no ensaio de WI



Fonte: A autoria própria (2022)

O ensaio deve ser realizado com uma alimentação padrão na granulometria abaixo de 3,35 mm. A massa a ser moída no ciclo inicial deve ser equivalente ao volume de 700 ml, obtido com auxílio de uma proveta graduada. As distribuições granulométrica e ponderada da carga moedora do moinho estão descritas na Tabela 7.

Tabela 7 - Distribuição granulométrica e ponderada da carga de bolas do moinho

Número de Bolas	Diâmetro das bolas (mm)	Peso (g)
43	36,8	9.094
67	29,7	7.444
10	25,4	694
71	19,0	2.078
94	15,5	815
285	-	20.125

Fonte: Luz et. al (2010)

No procedimento para determinação do *Work Index* (WI) para moinho de bolas utilizou-se de 15 kg de amostra, em condições normais, e os testes foram realizados em duplicata, conforme as seguintes etapas (BARBATO; SAMPAIO, 2007):

1) Britar 15 kg da amostra em circuito fechado com peneira de 3,35 mm. Homogeneizar a amostra em pilha prismática em bancada para retirar as alíquotas a serem utilizadas no ensaio;

2) Preencher uma proveta de 1000 ml até 700 ml com o minério. Essa proveta deverá ser batida contra uma superfície revestida de borracha para compactar o material. Realizar o procedimento em triplicata e considerar o valor do peso médio da amostra como o valor de massa da alimentação total (M);

3) Realizar a análise granulométrica da alimentação utilizando a escala de Tyler e determinar o D_{80} da alimentação;

4) Definir a massa passante do material de alimentação na abertura de malha de classificação determinada para o teste (A_m);

5) Utilizar a carga de bolas da Tabela 3 para preencher o moinho adicionando também a massa de mineiro determinada anteriormente. No primeiro ciclo, o número de rotações deve ser previamente definido, de acordo com as características do minério;

6) Descarregar todo o material presente no moinho, separar o minério das bolas e peneirar o material moído para determinar:

MAR = massa retida na malha do ensaio

MAP = massa passante na malha do ensaio

MAL = massa líquida passante na malha do ensaio

A fração nova de minério a ser adicionado no ciclo seguinte corresponde ao valor passante em (A_m) e deve ser retirada diretamente da pilha de homogeneização;

7) Para se calcular o valor da massa passante líquida (MAL), utilizar a equação (8):

$$(MAL) = (MA) - (MAP) \quad (8)$$

8) Carregar o moinho com a alimentação nova, mais a carga de bolas e mais a massa retida na malha do teste. Os ciclos serão repetidos até que a massa passante na malha do teste seja igual à massa da alimentação nova. Esse acontecimento indica o equilíbrio do sistema;

9) Para determinar a massa passante em A_m , contida na alimentação nova, utilizar como base a análise granulométrica realizada no item (6):

10) Calcular o valor da massa a ser adicionada no sistema (AAR) pela equação (9):

$$AAR = \frac{\textit{Alimentação Inicial}}{1 + \textit{Carga Circulante}} \quad (9)$$

11) Determinar o valor do desvio correspondente ao ciclo pela equação (10):

$$\textit{Desvio} = (MAP) - (AAR) \quad (10)$$

12) Determinar a mobilidade pela equação (11):

$$\text{Mob} = \frac{MAL}{N_R} \quad (11)$$

13) Calcular o número de rotações (N_R) pela equação (12):

$$(N_R) = \frac{(AAR)-(MA)}{Mob} \quad (12)$$

Para equação (12), o valor de (MA) refere-se ao ciclo abaixo;

14) Repetir as operações descritas até que a moagem atinja equilíbrio ou o valor de moabilidade inverta a tendência de crescimento ou de decréscimo em três ciclos. A confirmação de que o sistema entrou em equilíbrio é calculado pela média aritmética dos três últimos valores de moabilidade, sendo que a diferença entre o maior e o menor valor deve ser inferior a 5% em relação ao valor médio.

15) Após alcançar o equilíbrio, realizar granulometria da fração passante em Am para o último ciclo e determinar o P_{80} produto;

16) Calcular o valor de WI de acordo com a equação (13)

$$Wi = \frac{44,5}{Am^{0,23} \cdot Mob^{0,82} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \times 1,102 \quad (13)$$

Onde:

Am = abertura da malha de peneiramento do ensaio (μm);

Wi = índice de moabilidade para moagem (kWh/t);

P_{80} = abertura da peneira pela qual passam 80% da massa do produto (μm);

F_{80} = abertura da peneira pela qual passam 80% da massa da alimentação (μm);

Mob = média dos três últimos valores de moabilidade no estado de equilíbrio;

1,102 = fator de conversão de tonelada curta para tonelada métrica.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO

Para realizar os ensaios, as amostras de minério foram homogeneizadas e retirada uma alíquota de 1,0 kg. Esta amostra foi submetida a um processo de moagem em um pulverizador CT – 242, ao término do processo tem-se um material com 100% de granulometria $< 0,074$ mm (200 malhas). Esse procedimento teve como propósito, aumentar a área superficial dos minerais existentes na amostra e melhorar as leituras mineralógicas e químicas do material analisado. Depois do processo de redução granulométrica, a mostra foi quarteada, e usada nos ensaios de caracterização a seguir.

3.3.1 Difração de raios X (DRX)

A Difractometria de raios X foi utilizada para identificar as fases mineralógicas presentes no minério pegmatítico. As amostras foram analisadas no Laboratório de Caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), utilizando o difratômetro XRD 6000 da Shimadzu. A radiação utilizada foi $K\alpha$ do Cu (40kV/30mA) e a velocidade do goniômetro foi de 2° por minuto, em passo de $0,02^\circ$. A interpretação foi efetuada por comparação com padrões contidos em banco de dados da ICDD.

3.3.2 Fluorescência de raios X (FRX)

Os elementos químicos presentes na amostra do minério foram identificados, quantitativamente, por FRX, utilizando o equipamento EDX 720 da Shimadzu do Laboratório de Caracterização de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da UFCG. Essa técnica mede a intensidade dos Raios - X característicos emitidos pelos elementos que compõem a amostra, quando excitados. Para realização dessa análise, as amostras foram previamente compactadas em pastilhas com KBr.

3.4 ENSAIOS DE BENEFICIAMENTO

3.4.1 Britagem

Na realização do ensaio de britagem foi utilizado o Laboratório de Tratamento de Minérios da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, e foi empregado nesse ensaio cerca de 20,0 kg de amostras em um britador de mandíbulas.

Nos trabalhos desenvolvidos na UFCG, inicialmente determinou-se o *top size*. Depois, considerou-se que o material com tamanho acima de 127 mm (5,0 polegadas), deveria ser reduzido a uma granulometria $< 25,4$ mm (1,0 polegada), através de um equipamento de corte.

Em seguida, foi realizado o ensaio em um britador de mandíbulas (Figura 35), com abertura da boca de alimentação de 25,0 mm, e descarga de 5,0 mm. O britador de mandíbulas foi alimentado com 20,0 kg de amostra, e a granulometria do material foi reduzida a $< 5,0$ mm.

Figura 35 – Britagem do material no laboratório de tratamentos de minérios da UFCG



Fonte: Autoria própria (2022)

Depois da etapa de britagem, o material seguiu para a homogeneização e quarteamento. Foram separados 40 lotes, cada um de 1,0 kg, totalizando os 40,0 kg da alimentação.

Essas amostras foram obtidas de acordo com os procedimentos adequados de amostragem e preparação. Posteriormente, esse material foi armazenado, e guardado para não ocorrer alguma possível contaminação e/ou alteração.

3.4.2 Ensaios de moagem

Para este ensaio, a granulometria do minério foi reduzida com objetivo de alcançar a maior concentração de material de tamanho passante em 0,147 mm (malha 100). Dessa forma, é importante o controle do tempo de moagem e outros parâmetros, bem como o equipamento utilizado, de forma a se obter um produto com a granulometria desejada.

Nesse caso, realizou-se a moagem em um moinho de porcelana (Figura 36) com bolas de alumina, equipamento de bancada. Nos ensaios de moagem, foram usados aproximadamente 10,0 kg de amostra de quartzo leitoso (resíduo), e para cada ensaio foi usado cerca de 315,0 g, totalizando o número de 30 ensaios em laboratório. O tempo usado para reduzir a granulometria do material foi estabelecido em intervalos de 15 min. Assim, foi empregado no ensaio os seguintes tempos de moagem, de 15, 30, 45, 60 e 75 min. Esses tempos foram baseados nas características do material a ser moído (SAMPAIO; BARBATO, 2007).

Figura 36 – Moinho de bolas de alumina em escala laboratorial



Fonte: Autoria própria (2023)

Os ensaios de moagem foram realizados no laboratório de Tecnologia Mineral da UFPE, e o moinho foi alimentado com amostras de tamanhos $\leq 5,0$ mm. Para os ensaios foram usados um fator de enchimento de 35% (630 ml) e 40% (720 ml) do volume total da jarra (1800 ml) utilizada. Para o fator de enchimento de 35%, tem-se que 66% é corpo moedor e 34% é ocupado pelo material a ser moído. No caso, do fator de enchimento de 40%, tem-se que 72% é constituído de corpos moedores e 28% de material a ser moído. A carga do meio moedor usado nos ensaios para o fator de enchimento de 35% foi constituída por 180 bolas de alumina, e 315,0 g da amostra coletada da alimentação do circuito. Já a carga dos ensaios para o fator de enchimento de 40% foi formada por 197 bolas de alumina, e 315,0 g da amostra.

As Tabelas 8 e 9 apresentam a quantidade de bolas usadas, o diâmetro e volume dos meios moedores, e os tempos de moagem empregados de 15, 30, 45, 60 e 75 minutos.

Tabela 8 - Parâmetros empregados nos ensaios de moagem com 35% volume útil

Carga de enchimento	Nº de bolas	Diâmetro (mm)	Peso (g)	T (min)				
35%	74	14	215	15	30	45	60	75
	26	18	178,4					
	30	22	387,7					
	50	12	268,7					

Total 180 1049,4

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 9 - Parâmetros empregados nos ensaios de moagem com 40% volume útil

Carga de enchimento	N° de bolas	Diâmetro (mm)	Peso (g)	T (min)				
	74	14	215					
	26	18	178,4					
40%	47	22	607,7	15	30	45	60	75
	50	12	268,7					
Total	197		1269,8					

Fonte: Autoria própria (2023)

A velocidade de operação do moinho medida nessa primeira etapa de moagem foi $V_{op} = 70$ rpm. A partir da equação (3) é possível determinar a velocidade crítica do moinho, que foi de:

$$nc = 42,3/\sqrt{0,07} = 113,0 \text{ rpm.} \quad (16)$$

A velocidade de operação do moinho de bolas usado para o ensaio está relacionada à velocidade crítica. Assim, tem-se que o moinho possui um $nc=113,0 \text{ rpm}$, e está trabalhando com $V_{op}=70 \text{ rpm}$, logo sua velocidade de operação é de 62% da velocidade crítica.

Em um segundo momento dessa primeira etapa de moagem, foi alterado a $V_{op} = 70$ rpm para 100 rpm. E nesse caso, tem-se que a velocidade crítica determinada do moinho foi de:

$$nc = 42,3/\sqrt{0,07} = 113,0 \text{ rpm.}$$

A velocidade de operação do moinho de bolas usado para esse novo ensaio está relacionada à velocidade crítica. Assim, tem-se que o moinho possui um $nc=113,0 \text{ rpm}$, e está trabalhando com $V_{op}=100 \text{ rpm}$, logo sua velocidade de operação é de 88,5% da velocidade crítica.

Ao se tratar de uma amostra de resíduo da exploração de quartzo leitoso, é recomendável a utilização de um moinho de porcelana com bolas de alumina, e assim evitar a possível contaminação das amostras com ferro. Esse cuidado é importante, para preservar as características do mineral, principalmente para fins comerciais.

Para realização dos ensaios de moagem em laboratório foram usados os seguintes equipamentos:

- Um moinho de bolas, com Jarra de porcelana ($v = 1800$ ml), com dimensões de 130 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento;
- 180 esferas de alumina, com diâmetros de 14, 18, 22 e 12 mm;

- Um conjunto de peneiras de laboratório da série Tyler e um rotap de bancada.

Depois de realizado os ensaios de moagem, o material foi retirado e manuseado com muito cuidado para evitar perdas e contaminação, e em seguida foi realizado o peneiramento.

3.4.3 Ensaio granulométrico (P₈₀)

Este ensaio foi realizado depois da etapa de moagem, e foram determinadas as porcentagens das partículas em função de sua granulometria. A amostra passou por uma série de peneiras colocadas, no sentido de maior diâmetro para o menor diâmetro, sendo esta última peneira a de 0,147 mm (100 malhas). Na realização dos ensaios, foram usadas 07 peneiras para cada procedimento do peneiramento. Em seguida, determinou-se a distribuição granulométrica dos ensaios de moagem em laboratório.

Amostra

A amostra analisada foi proveniente do material coletado no circuito de beneficiamento da Mineração Florentino Ltda, após submetido à amostragem e homogeneização.

Materiais e equipamentos

- Série Tyler de peneiras: 3,5; 6; 10; 20; 35; 65; 100 malhas.
- Rotap de peneiras.
- Balança *sartorius BP 6100* digital.
- Sacos plásticos.

Procedimentos

As peneiras selecionadas foram colocadas no *rotap* (Figura 37). O peneiramento a seco (como na indústria o processo se dá de forma a seco, foi preferido também usar esse mesmo método em laboratório, mesmo sabendo das limitações) foi realizado da seguinte forma: Pesou-se a amostra, o tempo de peneiramento do *rotap* foi de 15 min, e o material retido em cada peneira foi pesado, etiquetado, e armazenado em sacos plásticos.

Figura 37 – Peneiras sob o rotap

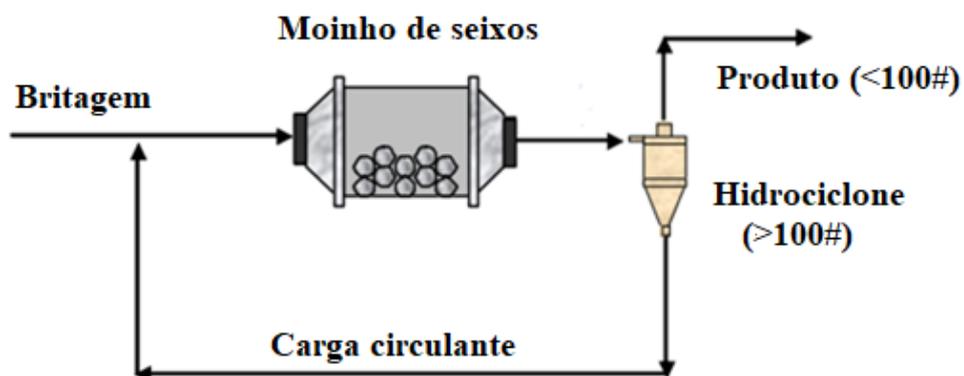


Fonte: Autoria própria (2023)

3.5 OTIMIZAÇÃO DO MOINHO DE SEIXOS

O equipamento de moagem a ser analisado nesta pesquisa faz parte do circuito de beneficiamento da empresa Mineração Florentino (Figura 38), situado no município de Pedra Lavrada – PB, no estado da Paraíba. A pesquisa pretende analisar e direcionar ao mercado industrial o material considerado resíduo na extração do veio de quartzo do pegmatito Alto Dois Irmãos – PB, e sugerir um modelo de moagem eficiente para minerais pegmatíticos, visando a melhoria da capacidade de redução granulométrica do moinho de seixos, no que se refere a produção de material passante em 0,147 mm e 0,074 mm (malha 100 e 200). A seguir são descritos os principais dados do circuito e a metodologia empregada.

Figura 38 – Fluxograma do circuito de moagem da Mineração Florentino



Fonte: Autoria própria (2022)

O sistema de moagem pesquisado é um circuito fechado normal, e o material com granulometria $\leq 25,0$ mm oriundo do britador de mandíbulas secundário, alimenta diretamente o moinho de seixos. O material da descarga deste equipamento segue para um classificador pneumático, onde o material é separado. O overflow deste classificador é considerado o produto, e apresenta granulometria $< 0,147$ mm (malha 100). Enquanto, o underflow é o material com tamanho $> 0,147$ mm, que retorna ao moinho para ser moído novamente.

Na realização dos cálculos do redimensionamento, usou-se os dados coletados do circuito que está sendo estudado (Tabela 10).

Tipo de circuito	Circuito fechado normal
Dimensões do moinho	1,6 X 3,5 m
Tipo do moinho	Descarga por overflow
Potência instalada	750 cv
Porcentagem da velocidade crítica	1150 rpm
% de minério	50
% de moedor	50
Classificação	01 ciclone pneumático

Fonte: Autoria própria (2023)

3.5.1 Determinação da energia para moagem

Para realizar o redimensionamento do equipamento é necessário determinar a energia para produzir a moagem desejada e na granulometria almejada. Existem diversas fórmulas empregadas para essa finalidade, porém, vamos utilizar a equação de Bond (Eq.17), que é a mais usada por apresentar os melhores resultados (LUZ *et.al.*, 2010).

O método de Bond baseia-se na equação por ele desenvolvida e no valor de Índice de Trabalho (WI-Tabela 11). A metodologia utilizada para determinação experimental do Índice de Trabalho (WI) em laboratório também foi estabelecida por Bond. A Lei de Bond é largamente empregada através da seguinte equação:

$$E = 10 \text{ WI} \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad (17)$$

Onde:

E = Energia necessária para moagem de uma tonelada curta (*short ton*, $st = 907$ kg) do minério em estudo; KWh/st;

WI = Índice de trabalho; KWh/st;

P_0 = Granulometria do produto no qual 80% passam numa determinada peneira de referência; em μm .

F = Granulometria da alimentação no qual 80% passa numa determinada peneira de referência; em μm .

Tabela 11 - WI kwh/t curta médios de alguns minerais e minérios

Mineral	Nº de testes	Moinho de barras		Nº de testes	Moinho de bolas	
		Média	Intervalo Mínimo-Máximo		Média	Intervalo Mínimo-Máximo
Alumina	3	12,2	9-17	6	17,9	7-34
Barita	6	5,7	2-12	7	5,8	4-9
Argila	4	12,5	6-18	11	10,8	4-23
Feldspato	7	11,0	8-16	7	11,7	9-14
Quartzo	1	14,4	-	13	14,4	11-21
Quartzito	8	12,3	8-19	13	11,2	7-16

Fonte: Adaptada de Luz; Sampaio; França (2010)

A granulometria de alimentação usado nos testes de Bond é de 13,2 mm para o moinho de barras e de 3,35 mm para o moinho de bolas. No entanto, qualquer moagem que fuja dessas condições deve ter o valor da energia calculada pela equação de Bond corrigida por fatores de correção.

A seguir, os fatores de correção de Bond e Rowland que foram utilizados:

EF_1 – Fator que corrige o tipo de moagem. Quando a moagem for a seco deve-se usar o valor de $EF_1 = 1,3$ que exprime o fato que a moagem a seco é 30% menos eficiente.

EF_2 – Fator que corrige o tipo de circuito. Para o circuito aberto em moinho de bolas: Requer uma energia extra quando comparado ao circuito fechado. A Tabela 12 apresenta o fator de ineficiência (número sem unidades) recomendado.

Tabela 12 - Fator de ineficiência em circuito aberto

	% Passante na malha							
	50	60	70	80	90	92	95	98
Fator	1,035	1,05	1,10	1,20	1,40	1,46	1,57	1,70

Fonte: Luz; Sampaio; França (2010)

EF_3 – Fator que corrige o diâmetro do moinho. A Tabela 13 descreve os valores desses fatores para os moinhos mais comuns. Esse fator só pode ser calculado após a escolha prévia (determinação do diâmetro e comprimento do equipamento) do moinho.

Tabela 13 - Fator de eficiência do diâmetro do moinho

Diâmetro do Moinho (m)

Interno Carcaça	Interno Revestimento	EF ₃
0,914	0,79	1,25
1,00	0,88	1,23
1,22	1,10	1,17
1,52	1,40	1,12
1,83	1,79	1,075
2,00	1,82	1,060
2,13	1,98	1,042
2,44	2,29	1,014
2,59	2,44	1,000
2,74	2,59	0,992
2,90	2,74	0,977
3,00	2,85	0,970
3,05	2,90	0,966
3,02	3,05	0,956
3,35	3,20	0,948
3,51	3,35	0,939
3,66	3,51	0,931
3,81	3,66	0,923
3,96	3,81	0,914
4,00	3,85	0,914

Fonte: Luz; Sampaio; França (2010)

EF_4 – Fator que corrige a granulometria de alimentação com tamanho excessivo

$$EF_4 = \frac{Rr + (WI - 7) \left(\frac{F - F_0}{F_0} \right)}{Rr} \quad (18)$$

$$Rr = \text{razão de redução} = \frac{F}{P}$$

F_0 = tamanho ótimo da alimentação para moinhos de bolas;

$$F_0 = 4.000 \sqrt{\frac{13}{WI}} \quad (19)$$

EF_5 – Fator que corrige a energia adicional para moagens extremamente finas (d_{80} menor que 0.074 mm). A expressão para determinar esse fator é:

$$EF_5 = \frac{P + 10,3}{1,145 \times P} \quad (20)$$

EF_6 – Fator que corrige a Relação de redução no moinho de barras;

EF_7 – Fator que corrige a Relação de redução no moinho de bolas, é dada por:

$$EF_7 = \frac{Rr - 1,22}{Rr - 1,35} \quad (21)$$

Essa equação só deve ser usada quando a relação de redução no moinho de bolas for menor que 6.

A partir da determinação da potência consumida por um moinho de bolas, é realizada a identificação das dimensões desse equipamento através da Tabela 14. Para comprimentos diferentes dos tabelados, a potência consumida varia na proporção direta do comprimento.

Tabela 14 - Características de moinho de bolas

Diâmetro		Compri.		Velocidade do			Potência do Moinho (HP)						Diâmetro	
Nominal		Nominal		Moinho			Descarga por overflow			Descarga por diafragma			(D) interno	
							% vol. da carga			% vol. da carga			ao revest.	
m	Pés	m	pés	rpm	%Vc	ft/min	35	40	45	35	40	45	m	pés
0,91	3,0	0,91	3,0	38,7	79,9	304	7	7	7	8	8	9	0,76	2,5
1,22	4,0	1,22	4,0	32,4	79,1	356	19	20	21	22	24	25	1,07	3,5
1,52	5,0	1,52	5,0	28,2	78,1	399	42	45	47	49	52	54	1,37	4,5
1,83	6,0	1,83	6,0	25,5	78,0	441	30	85	89	93	99	103	1,68	5,5
2,13	7,0	2,13	7,0	23,2	77,2	474	137	145	151	158	168	175	1,98	6,5
2,44	8,0	2,44	8,0	21,3	76,1	502	215	228	237	249	265	275	2,29	7,5
2,59	8,5	2,59	8,5	20,4	75,3	513	250	266	277	290	308	321	2,44	8,0
2,74	9,0	2,74	9,0	19,7	75,0	528	322	342	356	373	397	413	2,55	8,5
2,89	9,5	2,89	9,5	19,15	75,0	541	367	390	406	425	483	471	2,71	9,0
3,05	10,0	3,05	10,0	18,65	75,0	557	462	481	512	535	570	593	2,89	9,5
3,20	10,5	3,20	10,5	18,15	75,0	570	519	552	575	602	640	607	3,05	10,0
3,35	11,0	3,35	11,0	17,3	72,8	565	610	848	676	708	753	784	3,17	10,4
3,51	11,5	3,51	11,5	16,75	72,2	574	674	718	747	782	832	867	3,32	10,9
3,66	12,0	3,66	12,0	16,3	71,8	584	812	854	900	942	1003	1044	3,47	11,4
3,81	12,5	3,81	12,5	15,95	71,8	596	886	954	993	1040	1106	1152	3,63	11,9
3,96	13,0	3,96	13,0	15,60	71,7	607	1033	1130	1127	1233	1311	1365	3,76	12,4
4,11	13,5	4,11	13,5	15,30	71,7	620	1189	1269	1321	1379	1409	1532	3,93	12,9
4,27	14,0	4,27	14,0	14,8	70,7	623	1375	1464	1527	1595	1699	1771	4,08	13,4
4,47	14,5	4,47	14,5	14,55	70,8	635	1482	1598	1656	1730	1842	1921	4,24	13,9
4,57	15,0	4,57	15,0	14,1	69,8	638	1707	1817	1893	1980	2107	2196	4,39	14,4
4,72	15,5	4,72	15,5	13,85	69,6	648	1838	1956	2037	2132	2234	2363	4,54	14,9
4,88	16,0	4,88	16,0	13,45	68,9	651	2084	2217	2309	2417	2521	2678	4,69	15,4
5,03	16,5	5,03	16,5	13,20	68,7	659	2229	2370	2468	2585	2750	2803	4,85	15,9
5,18	17,0	5,18	17,0	13,0	68,7	670	2505	2764	2883	3010	3206	3344	5,00	16,4

Fonte: Chaves; Peres (2003)

3.5.2 Tamanho dos corpos moedores

Na realização do processo de moagem é necessário determinar o tamanho do meio moedor empregado na moagem e as respectivas porcentagens (quantidade de bolas em relação

ao volume do moinho). Esse parâmetro é um dos principais fatores que afetam a eficiência e a capacidade do moinho. O tamanho das barras e/ou bolas podem ser calculadas usando-se as equações (22), (23), (24) e posteriormente é possível fazer alguns ajustes, após a obtenção de resultados da prática industrial. A determinação do diâmetro máximo da bola é de grande importância, pois, é usual se fazer a reposição periódica do peso dos corpos moedores desgastados, utilizando-se apenas esse tipo de meio moedor. A seguir é apresentado algumas fórmulas matemáticas para determinar o tamanho máximo das bolas e barras.

De acordo com Bond, temos:

$$d_{\text{barra}} = \frac{F^{0,75}}{160} \sqrt{\frac{WI \times \rho}{\%VC \sqrt{3,281 \times D}}} \quad (22)$$

Para d em polegadas e D em ft, fica:

$$d_{\text{barra}} = \frac{F^{0,75}}{160} \cdot \sqrt{\frac{WI \times \rho}{\%VC \times \sqrt{D}}} \quad (23)$$

$$d_{\text{bola}} = \sqrt{\frac{F}{k}} \cdot \sqrt[3]{\frac{WI \times \rho}{\%VC \times \sqrt{D}}} \quad (24)$$

Onde:

d_{barra} = diâmetro máximo das barras; em mm;

d_{bola} = diâmetro máximo das bolas; em mm;

F = granulometria em que passa 80% da alimentação; em mm;

WI = índice de trabalho; em kwh/st;

ρ = massa específica do minério; em g/cm³;

%Vc = Velocidade de operação do moinho; % da velocidade crítica;

D = diâmetro interno ao revestimento da carcaça do moinho; em m;

K = fator que depende do tipo de moagem (ver Tabela 15)

Tabela 15 - Valores de K para diversos tipos de moinho e tipos de moagem

Tipo de Moinho	Valores de K
Moinho de bolas, com descarga por transbordo (overflow).	350
Moinho de bolas, com descarga por grade, a úmido.	330
Moinho de barras a seco.	335

Fonte: Luz; Sampaio; França (2010).

Uma outra variável importante, é identificar o desgaste dos corpos moedores após sua utilização na operação de moagem, ao final de algum tempo, é observado uma distribuição contínua de diâmetros, o que é denominado carga de equilíbrio. Por esse motivo é recomendável

que se dê a partida do moinho com uma carga de meio moedor próxima a carga de equilíbrio (LUZ *et.al.*, 2010).

Ao se determinar o tamanho máximo do diâmetro da bola, consultam-se as tabelas fornecidas por Bond e determina-se a percentagem em peso de cada diâmetro que vai ser utilizado (LUZ *et.al.*, 2010). A Tabela 16 apresenta a carga inicial de bolas.

Tabela 16 - Carga inicial de bolas (% peso)

Diâmetro (mm)	Diâmetro de reposição (mm)						
	115	100	90	75	65	50	40
115	23						
100	31	23					
90	18	34	24				
75	15	21	38	31			
65	7	12	20,5	39	34		
50	3,8	6,5	11,5	19	43	40	
40	1,7	2,5	4,5	8	17	45	51
25	0,5	1	1,5	3	6	15	49
Total	100	100	100	100	100	100	100

Fonte: Luz; Sampaio; França (2010)

3.6 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE MOAGEM DO QUARTZO PEGMATÍTICO

Para realizar a etapa de simulação foi empregado o software Usim Pac 3.2. Esse software é trabalhado desde 1986 pela BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières), e no Brasil é representado pela empresa CEMI Process Optimization. Porém em 2004, a CASPEO adquiriu os direitos comerciais e de desenvolvimento.

As informações utilizadas para a realização das simulações foram fornecidas pela empresa Mineração Florentino Ltda, que apresenta em seu processo de cominuição, uma moagem a seco através de um moinho de seixos, em um sistema fechado com um ciclone. Os dados obtidos na respectiva empresa foram: as variáveis de teste de laboratório, as informações operacionais do moinho estudado, a análise granulométrica da alimentação e do produto da moagem. Para este procedimento também foi utilizado as informações de ensaios de moagem em laboratório.

A execução do processo da simulação computacional ocorreu da seguinte forma: Inicialmente com a definição do balanço de massa, depois a calibração (variáveis coletadas na indústria) do modelo empregado e por último, a realização da simulação mineral.

De início os trabalhos foram direcionados para definir o material da alimentação e configuração, que são fundamentais para realização do processo de simulação. Neste caso, foi feito a inserção das fases, como a moagem é desenvolvida a seco, apenas colocamos a amostra do minério pegmatítico. Em seguida é imprescindível fazer a modificação da composição da

fase mineral. Para continuidade do preenchimento das informações, foram colocados os dados das densidades das amostras do resíduo analisado e da distribuição das faixas granulométricas.

Posteriormente, tem-se a determinação da operação da planta da unidade de beneficiamento, e a seleção do tipo de modelo matemático que será empregado na simulação da moagem (moinho de seixos). Assim, foi possível realizar a reprodução do circuito de moagem da Mineração Florentino.

Depois das fases um (01) e dois (02), seguimos para os procedimentos de calibração dos modelos dos equipamentos, com o objetivo que aconteça um processo de simulação o mais próximo da realidade operacional. Na calibração empregou-se os dados coletados, tais como: equipamentos do beneficiamento, ensaios de caracterização e amostragens. Após a definição da calibração da etapa que se deseja, é possível fazer a simulação do processo de moagem e obter diversos cenários.

3.6.1 Calibração de modelos

A etapa de calibração dos modelos é executada depois da coleta das informações experimentais, e direcionada ao processo industrial que se deseja analisar. Esse procedimento é realizado a partir de um grupo de simulações, com informações de entrada e saída, conhecidas e representativas do processo.

Na realização da calibração deve-se informar as variáveis físicas dos equipamentos, pois trata-se de modelos fenomenológicos que envolvem os princípios físicos, químicos e de engenharia.

No caso desta pesquisa, se fez necessário informar os dados do processo de moagem (moinho de seixos), como por exemplo: a quantidade de moinhos usados (01), as dimensões deste moinho de seixos (comprimento x largura), tipo de corpo moedor e sua densidade, carga de enchimento e velocidade de operação.

De posse destas variáveis é realizado o procedimento de calibração, onde é encontrado a solução matemática ótima dessas variáveis, com o objetivo de validar a calibração.

Vale ressaltar que é possível fazer a calibração individual e/ou para o circuito completo, porém foi feito apenas para a operação de moagem. O desenvolvimento da simulação a partir desta calibração, é o ponto de partida para obter os diversos cenários que serão estudados.

O processo de simulação foi iniciado pela operação de moagem que ocorre através do moinho de seixos, associado a um ciclone pneumático. Neste caso, foi empregado o modelo 116 – moinho de bolas (1). Esse modelo 116 é baseado nas teorias energéticas de moagem e

em particular na lei de Bond e nos métodos de Allis Chalmers para dimensionamento de moinhos. Na Tabela 17 é apresentado os parâmetros usados para o modelo 116.

Tabela 17 - Parâmetros utilizados no modelo 116 – moinho de Bolas

Nº	Parâmetros	Valor Padrão
1	Número de moinhos em paralelo	1
2	Diâmetro interno do moinho (m)	3
3	Relação comprimento/diâmetro	1
4	Porcentagem de carregamento volumétrico de bolas	40
5	Fração de velocidade crítica	0.7
6	Gravidade específica da bola	7.8
7	Índice de trabalho por componente (kwh/st)	14
8	Descarga do moinho (transbordamento ou descarga da grelha)	Overflow
9	Ajuste de potência	1
10	Ajuste da inclinação da distribuição de saída Rosin-Rammler	1
11	Número de tamanhos de bola	1
12	Potência do moinho calculada (kW)	0
13	Carga de bola calculada (toneladas métricas)	0
14	Maior diâmetro calculado das esferas (mm)	0
15	Levar em consideração EF4, EF5, EF6 (Não ou Sim)	Sim
16	Levar em consideração o fator de tamanho da bola (Não ou Sim)	Não
17	Índice de abrasão do material	0
18	Tamanhos de bola em ordem decrescente (mm)	0

Fonte: CASPEO (2006)

Para a simulação envolvendo o equipamento de moagem foram usados os parâmetros da Tabela 17.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 AMOSTRAGEM

A coleta das amostras (Figura 26) primárias foram realizadas no município de Pedra Lavrada/PB, mais especificamente na unidade de beneficiamento de quartzo, feldspato, mica e outros minérios pegmatíticos, pertencente a empresa Mineração Florentino Ltda. A Tabela 18 apresenta as massas das amostras coletadas em campanha.

Tabela 18 - Identificação e as massas das amostras primárias coletadas

Amostra	Tipo	Massa Coletada (Kg)
A	Run of mine quartzo (ROM)	25
B	Produto britador primário	20
C	Produto britador secundário	20
D	Alimentação do moinho	20
E	Descarga do moinho	15
F	Underflow do ciclone pneumático	15
G	Produto final	10

Fonte: Autoria própria (2022)

A facilidade de acesso às instalações da empresa, bem como ao acesso às informações da mesma foram fatores cruciais na escolha do local para coleta das amostras, frente a outras opções na região.

4.1.1 Análise granulométrica

A seguir é apresentado os resultados das análises granulométricas das amostras coletadas (Tabelas 19, 20, 21, 22, 23 e 24) no circuito de cominuição da Mineração Antônio Florentino Ltda.

As Tabelas 19 e 20 demonstram a granulometria do material após a britagem primária e secundária. A britagem primária apresenta que 21,87% do material está acima de 25,0 mm e 60,13% acima de 4,69 mm.

Tabela 19 - Distribuição granulométrica do produto do britador primário – B

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+25,0	21,87	21,87	78,13
-25,0+4,699	60,13	82,00	18,00
-4,699+2,362	11,47	93,47	6,53
-2,362+1,651	2,93	96,40	3,60

-1,651+0,589	1,87	98,27	1,73
-0,589+0,295	0,66	98,93	1,07
-0,295+0,147	0,40	99,93	0,07
-0,147+0,074	0,66	99,99	0,01
Total	99,99	-	-

Fonte: Autoria própria (2022)

Após a britagem secundária, tem-se uma redução de 21,87% para 2,27% de material acima de 25,0 mm. Também observa-se que ocorre um aumento de 60,13% para 87,55% de material entre 25,0 e 4,59 mm.

Tabela 20 - Distribuição granulométrica do produto do britador secundário – C

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+25,0	2,27	2,27	97,73
-25,0+4,699	87,55	89,82	10,18
-4,699+2,362	4,95	94,77	5,23
-2,362+1,651	1,34	96,11	3,89
-1,651+0,589	1,34	97,45	2,55
-0,589+0,295	0,80	98,25	1,75
-0,295+0,147	0,80	99,05	0,95
-0,147+0,074	0,94	99,99	0,01
Total	99,99	-	-

Fonte: Autoria própria (2022)

Porém, a quantidade de material passante em 4,69 mm ainda é muito pequeno (10,18%), e quanto maior a porcentagem desse material, melhor será alimentação do moinho. Assim, a redução do processo de britagem, visando a alimentação da moagem, demanda de ajustes.

Na Tabela 21 é possível verificar que cerca de 75% do material que alimenta o moinho de seixos na indústria é maior 4,69 mm e menor 25,0 mm.

Também se observa que a granulometria do material vai até 0,295 mm, ou seja, é praticamente zero as partículas do material com diâmetro inferior. Por fim, tem-se que o material com granulometria próxima ou passante na malha 100 (0,147 mm), que é foco da pesquisa é próximo de zero.

Tabela 21 - Distribuição granulométrica da alimentação do moinho de seixos – D

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+25,0	5,73	5,73	94,27
-25,0+4,699	69,07	74,80	25,00
-4,699+2,362	14,66	89,46	10,54
-2,362+1,651	4,66	94,12	5,88

-1,651+0,589	4,0	98,12	1,88
-0,589+0,295	0,80	98,92	1,08
-0,295+0,147	0,40	99,32	0,68
-0,147+0,074	0,67	99,99	0,01
Total	99,99	-	-

Fonte: Autoria própria (2022)

A Tabela 21 (Distribuição granulométrica da alimentação do moinho de seixos – D) é descrita e merece atenção, devido apresentar o comportamento do tamanho das partículas que alimenta o moinho, e ser responsável por influenciar diretamente o processo de moagem. Neste caso, temos uma alimentação do processo de moagem com granulometria elevada (75%), devendo fazer melhorias na peneira, para termos uma percentagem maior de material $\leq 10,0$ mm alimentando o equipamento de moagem.

Na Tabela 22 é visto a distribuição granulométrica do produto da descarga do moinho de seixos. Essa tabela apresenta 100% de material passante em 25,0 mm e cerca de 98,89% em 4,69 mm. No que se refere a malha de interesse da pesquisa (0,147 mm) temos cerca de 40,09% de material passante e na malha 200 (0,147 mm) um valor de 2,01%. Quando comparamos esses resultados a Tabela 21(alimentação do moinho de seixos), observamos um crescimento de 0,68% para 40,09% de material passante em 0,147 mm. Essa informação descreve a capacidade atual de redução granulométrica (39,41%) do moinho de seixos, e afirma a produção (40,09%) de material em 0,147 mm em relação a quantidade de minério na alimentação.

Tabela 22 – Distribuição granulométrica da saída do moinho de seixos

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+25,0	-	-	100
-25,0+4,699	1,11	1,11	98,89
-4,699+2,362	0,64	1,75	98,25
-2,362+1,651	0,59	2,34	97,66
-1,651+0,589	6,96	9,30	90,70
-0,589+0,295	18,25	27,55	72,45
-0,295+0,147	32,36	59,91	40,09
-0,147+0,074	38,08	97,99	2,01
-0,074+0,053	2,00	99,99	0,01
Total	99,99	-	-

Fonte: Autoria própria (2022)

No caso da Tabela 23 é possível compreender a distribuição granulométrica do material que retorna ao moinho de seixos como carga circulante.

Tabela 23 - Distribuição granulométrica da alimentação do overflow – E

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+25,0	-	-	-
-25,0+4,699	-	-	-
-4,699+2,362	-	-	-
-2,362+1,651	0,81	0,81	99,19
-1,651+0,589	5,55	6,36	93,64
-0,589+0,295	51,55	57,92	42,08
-0,295+0,147	25,61	83,53	16,47
-0,147+0,074	14,36	97,89	2,11
-0,074+0,053	2,10	99,99	0,01
Total	99,99	-	-

Fonte: Autoria própria (2022)

Já na Tabela 24 pode ser observado a distribuição granulométrica do produto da moagem. Podendo constatar que apenas 0,54% do material está retido em 0,147 mm, essa informação é importante para o controle de qualidade. As empresas quando da compra do quartzo leitoso, exige que o bag de 1.000 kg tenha no máximo 7% de material retido na malha de 0,147 mm.

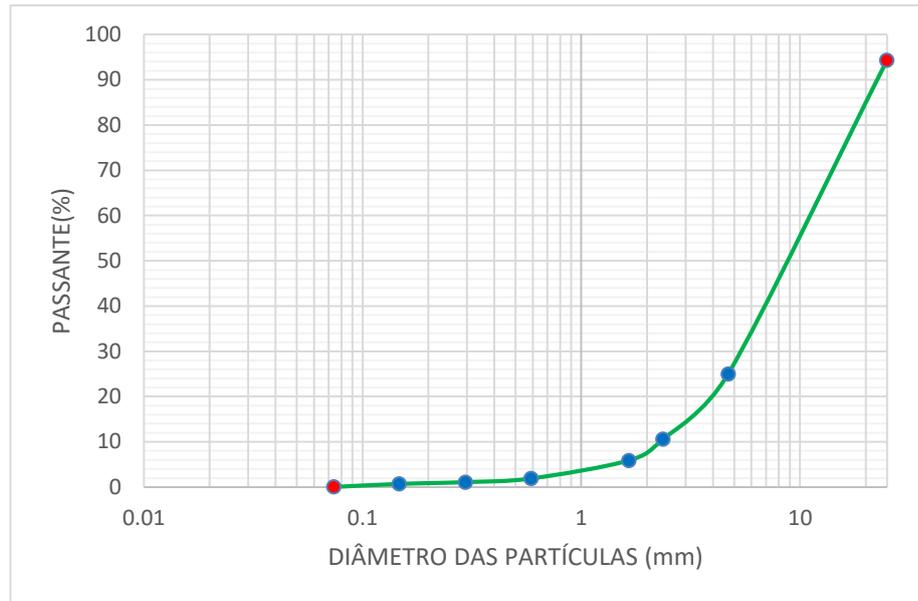
Tabela 24 - Distribuição granulométrica do produto após o hidrociclone – F

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+25,0	-	-	-
-25,0+4,699	-	-	-
-4,699+2,362	-	-	-
-2,362+1,651	-	-	-
-1,651+0,589	-	-	-
-0,589+0,295	-	-	-
-0,295+0,147	0,54	0,54	99,46
-0,147+0,074	93,56	94,10	5,90
-0,074+0,053	5,90	100	0,0
Total	100,00	-	-

Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 39, apresenta o comportamento real do tamanho das partículas que atualmente alimenta o processo de moagem. Observa-se na curva que 30% do material está acima de 4,69 mm, e 45% acima de 10,0 mm.

Figura 39 – Curva granulométrica do moinho em escala industrial



Fonte: Autoria própria (2022)

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO

4.2.1 Análise química

A Tabela 25 apresenta os resultados das composições químicas, obtidas por FRX, das amostras *Run of Mine* (ROM) (A), alimentação do moinho de seixos (D) e produto do moinho de seixos (F).

Tabela 25 - Composição química das amostras ROM (A), alimentação do moinho de seixos (D) e produto do moinho de seixos (F)

Amostras	Composição Química (%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	Ta ₂ O ₅	HO ₂ O ₃
A	92.926	6.318	0.358	0.269	0.069	0.060		
D	94.748	4.507	0.367	0.322		0.055		
F	96.373	2.975	0.355	0.099	0.075	0.058	0.036	0.030

Fonte: Autoria própria (2022)

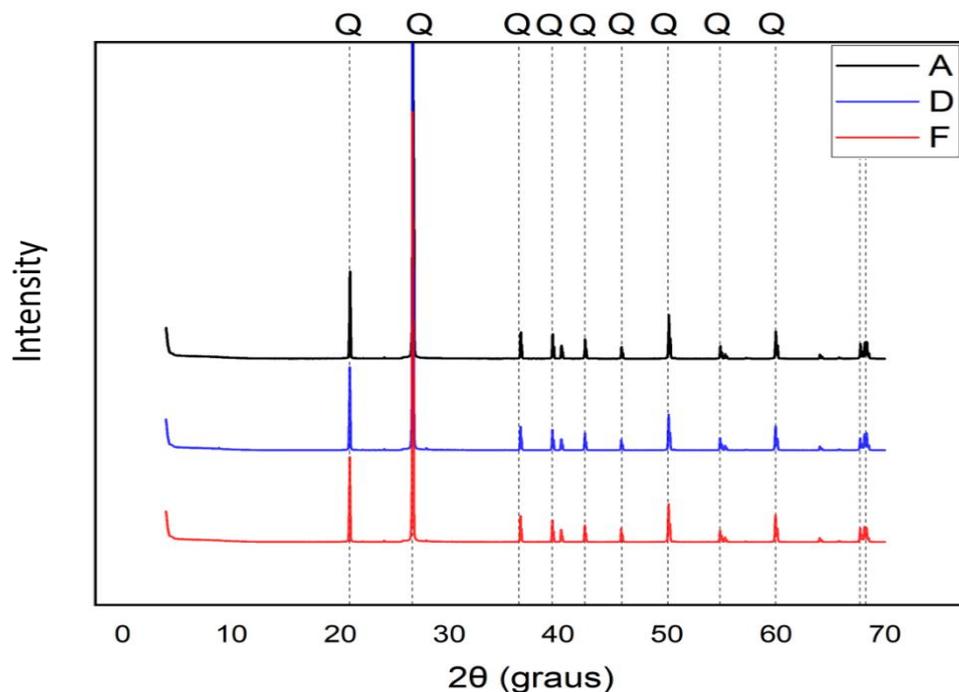
Os resultados da FRX foram comparados aos dados da literatura apresentados na Tabela 2 – Especificações químicas do mineral quartzo para uso nas indústrias (BARBOSA; PORPHÍRIO, 1995). Verifica-se na Tabela 25 que o teor de SiO₂ do produto da moagem é 96,37%, logo, este atende as especificações para produção de areia para construção civil (80%), areia para fundição (88-99%), ferrossilício (96%), e também de tijolo refratário (96-98%). O teor de Al₂O₃ da amostra F foi de 2,97% (Tabela 5), o que permite o uso como areia de fundição e vidro colorido, onde o valor é variável. Quanto ao teor Fe₂O₃, o material F apresenta valor

abaixo de 0,2% (0,075%) indicado na referência (Tabela 2), permitindo seu uso na sílica pulverizada e ferrossilício. Os resultados obtidos estão dentro ou próximo das tabelas de referência, indicando que o minério pesquisado apresenta qualidade para ser utilizado em escala industrial.

4.2.2 Difração de raios-X

Na Figura 40 são apresentados os difratogramas das amostras analisadas.

Figura 40 – Difratograma das amostras A, D e F



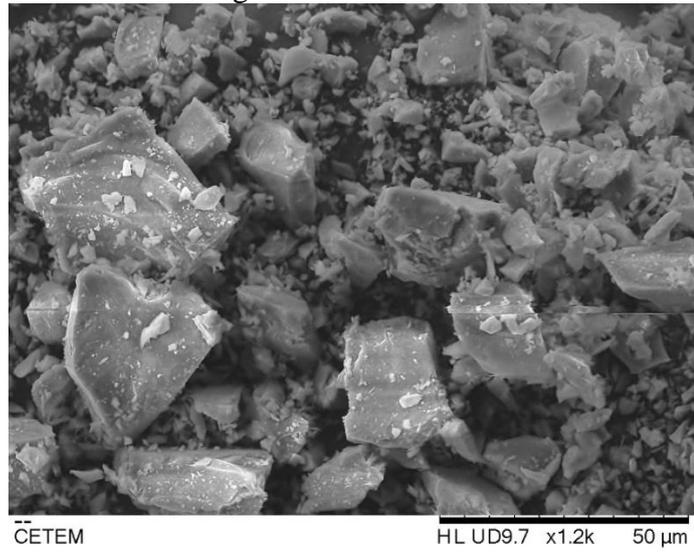
Fonte: Autoria própria (2022)

Os difratogramas das amostras A, D e F, indicaram apenas a presença de quartzo para ambas as amostras, como esperado. Verifica-se as coincidências dos picos dos difratogramas das três amostras, característicos do mineral quartzo na Figura 39. Baseado em Luz; Sampaio; França (2010), é possível identificar que o comportamento dos difratogramas obtidos são semelhantes aos descritos pelos autores.

4.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

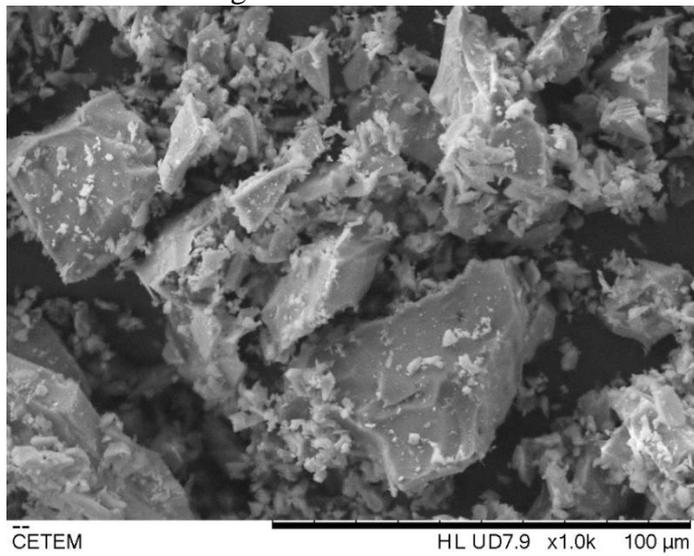
As Figuras 41 a 43 apresentam as imagens topográficas das superfícies obtidas pelo MEV para as amostras A, D e F.

Figura 41 - Amostra A



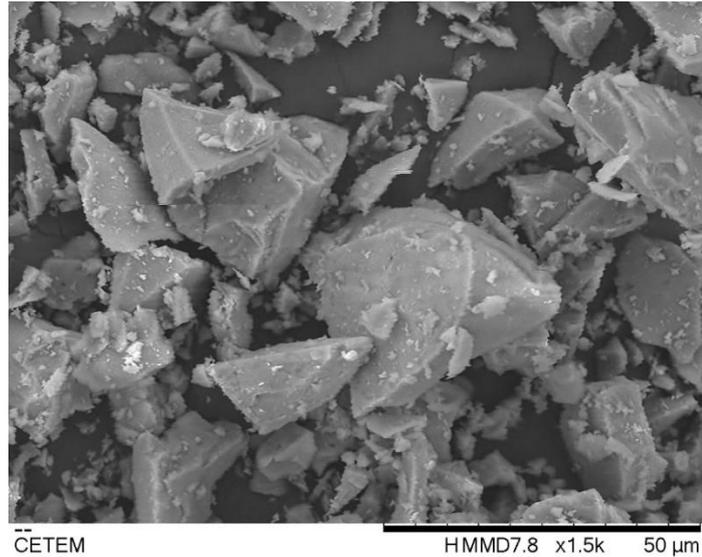
Fonte: Aatoria própria (2022)

Figura 42 – Amostra D



Fonte: Aatoria própria (2022)

Figura 43 – Amostra F



Fonte: Autoria própria (2022)

Ao interpretar as Figuras 41 a 43, observa-se que as amostras A, D e F, são compostas por quartzo de alta pureza, sem interferência de minerais acessórios, contribuindo para os resultados expressos nos difratogramas de raios X, disposto no item seguinte. Em todas as amostras investigadas as partículas de quartzo apresentam morfologia irregular, com destaque para a presença de fratura conchoidal típica. A granulometria das partículas é predominantemente inferior a 50 μm , estando estas parcialmente recobertas por detritos de menor tamanho.

4.2.4 Densidade

Os resultados da determinação da densidade aparente das amostras (ROM, retida na peneira e produto granulado) do circuito de cominuição do minério pegmatítico Alto Dois Irmãos, Pedra Lavrada-PB estão apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - Densidade aparente

Amostra	Massa (g)	Desvio padrão	Densidade aparente (g/cm³)
A - ROM	6.1693	0.0003	2.6683
D - Retida na peneira	2.7988	0.0005	2.6618
F - Produto granulado	8.2805	0.0004	2.6782

Fonte: Autoria própria (2022)

Para a amostra A (ROM), a densidade identificada foi de 2,6683 g/cm³ com desvio padrão de 0,0003 cm³. Já no caso da amostra D (alimentação do moinho de seixos), a densidade foi de

2.6618 g/cm³ com desvio padrão de 0.0005 cm³. E a amostra F (produto granulado do moinho de seixos), apresentou densidade de 2.6782 g/cm³ com desvio padrão de 0.0004 cm³. Esses valores obtidos estão alinhados com a densidade teórica do quartzo, que corresponde a 2,65 g/cm³ (BARBOSA; PORPHÍRIO, 1995).

Também é possível verificar uma tendência de um pequeno aumento (segunda casa decimal) da densidade relativa entre o minério da alimentação e do produto da moagem, o que pode ser atribuído ao maior empacotamento, redução de interstícios vazios, do minério mais fino em mesmo volume.

4.2.5 Determinação do Índice de Trabalho (*Work Index - WI*)

A resistência do minério pegmatítico pesquisado, em relação ao processo de cominuição, foi identificada indiretamente pela determinação do Índice de Trabalho. A Tabela 27 apresenta a referência dos valores de Work Index (WI), e a Tabela 28 os parâmetros e valores calculados no ensaio realizado. As atividades operacionais do ensaio foram direcionadas para uma malha de controle de 0,147 mm (100# Tyler).

Tabela 27 - Classificação dos valores de Work Index (WI)

WI de Bond(KWh/t)	Resistência a quebra
7-9	Baixa
9-14	Média
14-20	Alta
>20	Muito Alta

Fonte: adaptado de Napier-Mun et. al., (1999)

Tabela 28 - Ensaio de Work Index (WI) do minério pesquisado

Amostra	Malha (mm)	F80 (mm)	P80 (mm)	Gpb g/rotação	WI kWh/t	Tenacidade
Quartzo Leitoso	0,147	1,695	0,129	1,503	15,9	alta

Fonte: Autoria própria (2022)

A partir do ensaio foi obtido um valor de 15,9 Kwh/ton curta para a moagem do minério pesquisado. O índice determinado está próximo dos valores sugeridos (BERALDO, 1987). Conforme a Tabela 27, o resultado do ensaio de WI (15,9) está entre 14 – 20, caracterizando o material estudado, como de alta resistência a quebra. Essa informação é fundamental para o dimensionamento (comprimento x diâmetro) correto do moinho, permitindo um consumo energético equilibrado no processo de moagem.

4.3 ENSAIOS DE BENEFICIAMENTO

4.3.1 Ensaios de britagem

De início é apresentado na Tabela 29 e na Figura 44, os resultados da análise granulométrica da amostra de tamanho $\leq 5,0$ mm, que foi fragmentada em um britador de mandíbulas em laboratório e utilizada nos ensaios de moagem.

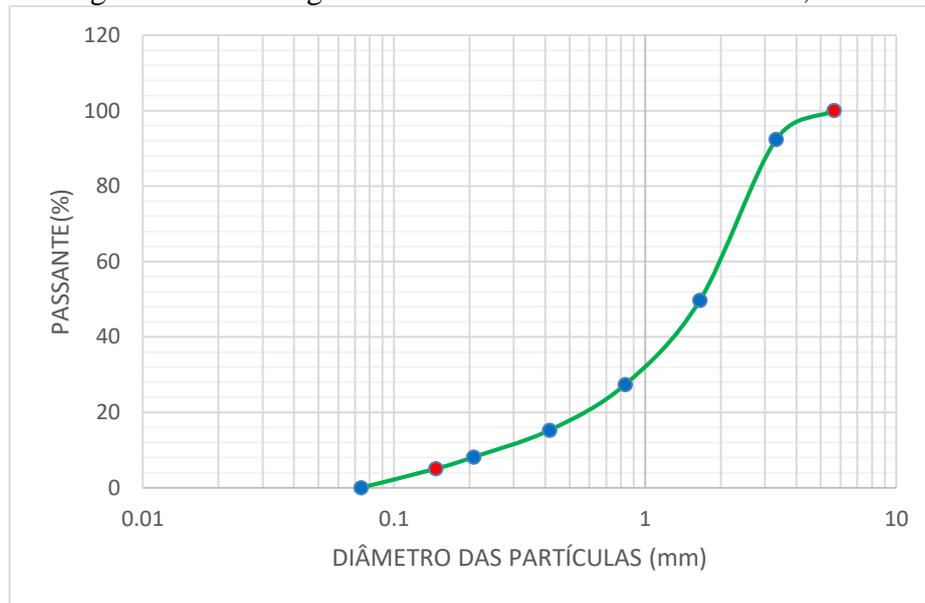
Tabela 29 - Distribuição granulométrica do material britado a – 5,0 mm

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+5,660	0,00	0,00	100,00
-5,660+3,327	7,62	7,62	92,38
-3,327+1,651	42,72	50,34	49,66
-1,651+0,833	22,31	72,65	27,35
-0,833+0,417	12,09	84,74	15,26
-0,417+0,208	7,12	91,86	8,14
-0,208+0,147	3,11	94,97	5,03
-0,147+0,074	5,03	100,00	0,00
Total	100,00	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Na Tabela 29 tem-se que dos 100% da amostra (315,0 g) pesada após a britagem, é identificada ao fim do peneiramento, não ocorrendo perdas nos ensaios. Em relação ao diâmetro das partículas, verifica-se que 100% do material é menor de 5,66 mm, 50% está no tamanho menor que 1,651 mm, e 25% está com granulometria menor que 0,833 mm. E observa-se também que a fração passante em 0,147 mm (100 malhas) que é o interesse da pesquisa foi de aproximadamente 5,03%.

Figura 44 – Curva granulométrica do material britado – 5,0 mm



Fonte: Autoria própria (2023)

No caso da Figura 44, a curva descreve de forma mais clara que 100% do material usado nos ensaios estão abaixo de 5,66 mm.

4.3.2 Ensaios de moagem

Alimentação do moinho com partículas $\leq 5,0$ mm, carga de enchimento de 35% e velocidade de operação de 70 rpm.

A seguir é apresentado as Tabelas 30, 31, 32, 33, 34 e 35, que se refere a distribuição granulométrica para o ensaio de moagem com alimentação de tamanho de partículas $\leq 5,00$ mm.

Tabela 30 - Distribuição granulométrica da moagem (5 min)

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	8,11	8,11	91,89
-3,327+1,651	38,35	46,46	53,54
-1,651+0,833	20,16	66,62	33,38
-0,833+0,417	12,45	79,07	20,93
-0,417+0,208	8,46	87,53	12,47
-0,208+0,147	4,07	91,60	8,40
-0,147+0,074	8,40	100	0,00
Total	100	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 31 - Distribuição granulométrica da moagem (15 min)

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	8,41	8,41	91,59
-3,327+1,651	37,86	46,27	53,73
-1,651+0,833	17,13	63,40	36,60
-0,833+0,417	10,76	74,16	25,84
-0,417+0,208	8,13	82,29	17,71
-0,208+0,147	4,71	87,00	13,00
-0,147+0,074	13,00	100	0,00
Total	100	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 32 - Distribuição granulométrica da moagem (30 min)

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	6,50	6,50	93,50
-3,327+1,651	33,55	40,05	59,95
-1,651+0,833	14,63	54,68	45,32
-0,833+0,417	9,19	63,87	36,13
-0,417+0,208	7,64	71,51	28,49
-0,208+0,147	5,18	76,69	23,31
-0,147+0,074	23,30	99,99	0,01
Total	99,99	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 33 - Distribuição granulométrica da moagem (45 min)

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	6,60	6,60	93,40
-3,327+1,651	29,52	36,12	63,88
-1,651+0,833	13,07	49,19	50,81
-0,833+0,417	7,48	56,67	43,33
-0,417+0,208	6,89	63,56	36,44
-0,208+0,147	6,00	69,56	30,44
-0,147+0,074	30,44	100,00	0,00
Total	99,99	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 34 - Distribuição granulométrica da moagem (60 min)

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	6,17	6,17	93,83
-3,327+1,651	30,67	36,84	63,16
-1,651+0,833	11,36	48,20	51,80
-0,833+0,417	5,97	54,17	45,83
-0,417+0,208	5,00	59,17	40,83
-0,208+0,147	5,03	64,20	35,80
-0,147+0,074	35,80	100,00	0,00
Total	100,00	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 35 - Distribuição granulométrica da moagem (75 min)

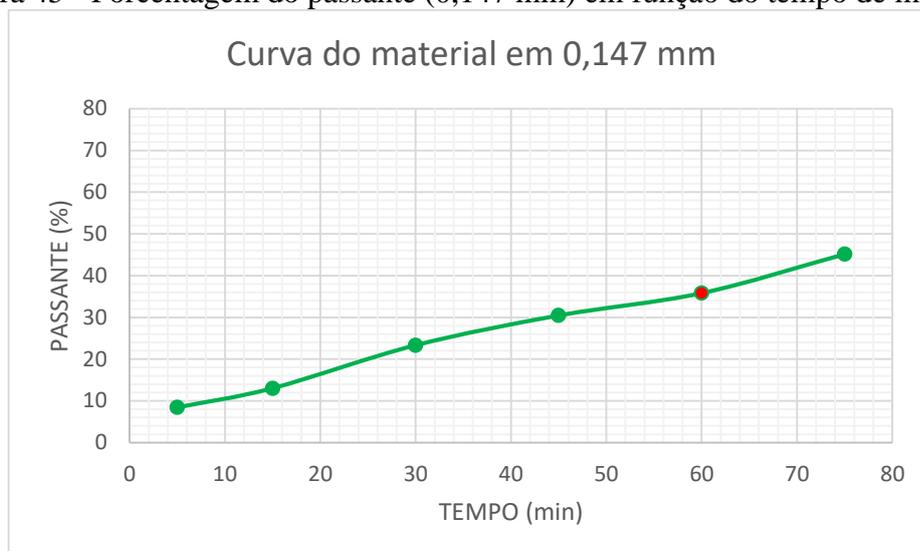
Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	5,71	5,71	94,29
-3,327+1,651	28,64	34,35	103,35
-1,651+0,833	10,47	44,82	55,18
-0,833+0,417	5,41	50,23	49,77
-0,417+0,208	4,63	54,86	45,14
-0,208+0,147	4,88	59,74	40,26
-0,147+0,074	40,26	100,00	0,00
Total	100,00	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Para moagem de 5 minutos, observa-se que o material passante na abertura de 0,147 mm foi de 8,40 % (Tabela 30). Já na moagem de 30 min, tem-se um aumento de 8,40 % para 23,31 % de material passante em 0,147 mm (Tabela 32). No tempo de moagem de 45 min, apresenta um aumento nessa mesma abertura de 23,31 % para 30,44 % (Tabela 33). E com um tempo de 60 min, foi identificado que a percentagem do passante em 0,147 mm é de 35,80%, aumentando para 45,14 % em um tempo de moagem de 75 min (Tabela 35).

Nota-se que a partir do aumento do tempo de moagem, também aumenta a percentagem do passante em 0,147 mm. Desta forma, para os tempos de 5, 15, 30, 45, 60 e 75 min, as percentagens do passante foram 8,40; 13,00; 23,31; 30,44; 35,80; 45,14 %, respectivamente (Figura 45).

Figura 45 - Porcentagem do passante (0,147 mm) em função do tempo de moagem



Fonte: Autoria própria (2023)

Alimentação do moinho com partículas $\leq 5,0$ mm, carga de enchimento de 40% e velocidade de operação de 70 rpm

A seguir é apresentado as Tabelas 36, 37, 38, 39, 40 e 41, que se refere a distribuição granulométrica para o ensaio de moagem com alimentação de tamanho de partículas $\leq 5,00$ mm.

Tabela 36 - Distribuição granulométrica da moagem (5 min)

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	8,58	8,58	91,42
-3,327+1,651	39,75	48,33	51,67
-1,651+0,833	19,60	67,93	32,67
-0,833+0,417	12,00	79,93	20,07
-0,417+0,208	8,21	88,14	11,86
-0,208+0,147	4,00	92,14	7,86
-0,147+0,074	7,86	100	0,00
Total	100	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 37 - Distribuição granulométrica da moagem (15 min)

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
--------------	------------	---------------	--------------

+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	6,32	6,32	93,68
-3,327+1,651	30,62	36,94	63,06
-1,651+0,833	15,60	52,54	47,46
-0,833+0,417	11,37	63,91	36,09
-0,417+0,208	11,07	74,98	25,02
-0,208+0,147	6,80	81,78	18,22
-0,147+0,074	18,22	100	0,00
Total	100	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 38 - Distribuição granulométrica da moagem (30 min)

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	4,37	4,37	95,63
-3,327+1,651	28,71	33,08	66,92
-1,651+0,833	13,29	46,37	53,63
-0,833+0,417	7,00	53,37	46,63
-0,417+0,208	10,86	64,23	35,77
-0,208+0,147	7,97	72,20	27,80
-0,147+0,074	27,80	100	0,00
Total	100	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 39 - Distribuição granulométrica da moagem (45 min)

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	4,74	4,74	95,26
-3,327+1,651	23,38	28,12	71,88
-1,651+0,833	9,58	37,70	62,30
-0,833+0,417	6,39	44,09	55,91
-0,417+0,208	8,14	52,23	47,77
-0,208+0,147	8,80	61,03	38,27
-0,147+0,074	38,96	99,99	0,01
Total	99,99	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 40 - Distribuição granulométrica da moagem (60 min)

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	5,27	5,27	94,73
-3,327+1,651	21,05	26,32	73,68
-1,651+0,833	7,32	33,64	66,36
-0,833+0,417	3,82	37,46	62,54
-0,417+0,208	6,20	43,66	56,34
-0,208+0,147	7,94	51,60	48,40
-0,147+0,074	48,40	100,00	0,00
Total	100,00	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 41 - Distribuição granulométrica da moagem (75 min)

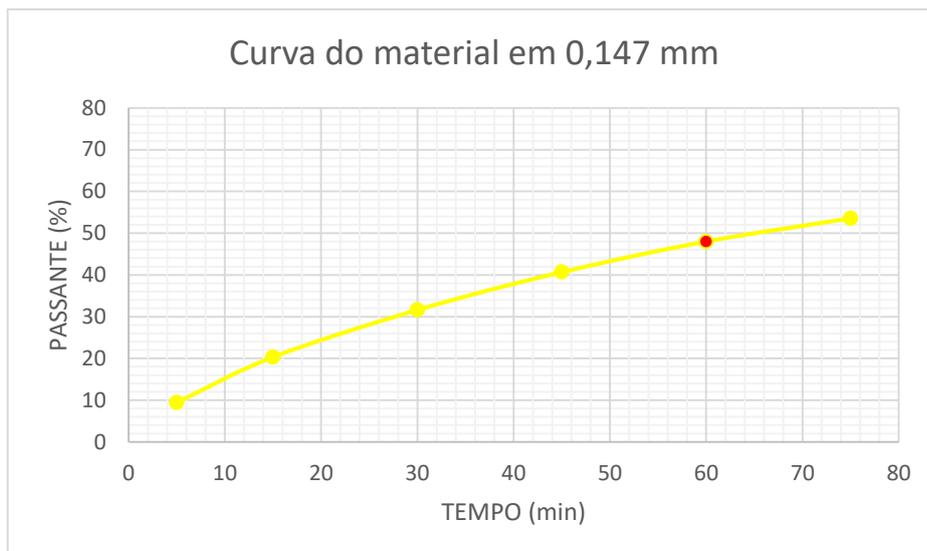
Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	5,31	5,31	94,69
-3,327+1,651	21,31	26,62	73,38
-1,651+0,833	5,94	32,56	67,44
-0,833+0,417	3,10	35,66	64,34
-0,417+0,208	4,22	39,88	60,12
-0,208+0,147	6,41	46,29	53,71
-0,147+0,074	53,71	100,00	0,00
Total	100,00	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Na moagem de 5 minutos, observa-se que o material passante na abertura de 0,147 mm foi de 7,86 % (Tabela 36). Já na moagem de 30 min, tem-se um aumento de 7,86 % para 27,80 % de material passante em 0,147mm (Tabela 38). No tempo de moagem de 45 min, apresenta um aumento nessa mesma abertura de 27,80 % para 38,27 % (Tabela 39). E com um tempo de 60 min, foi identificado que a percentagem do passante em 0,147 é de 48,40%, aumentando para 53,71 % em um tempo de moagem de 75 min (Tabela 41).

Também é observado que aumentando o tempo de moagem, também aumenta a percentagem do passante em 0,147 mm. Assim, para os tempos de 5, 15, 30, 45, 60 e 75 min, as percentagens do passante foram 7,86; 18,22; 27,80; 38,27; 48,40; 53,71 %, respectivamente (Figura 46).

Figura 46 - Porcentagem do passante (0,147 mm) em função do tempo de moagem



Fonte: Autoria própria (2023)

Alimentação do moinho com partículas $\leq 5,0$ mm e carga de enchimento de 35% e velocidade de operação de 100 rpm

A seguir é apresentado as Tabelas 42, 43, 44, 45, 46 e 47, que se refere a distribuição granulométrica para o ensaio de moagem com alimentação de tamanho de partículas $\leq 5,00$ mm.

Tabela 42 – Distribuição granulométrica da moagem (5 min)

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	7,35	7,35	92,65
-3,327+1,651	39,10	46,45	53,55
-1,651+0,833	18,50	64,95	35,05
-0,833+0,417	11,50	76,45	23,55
-0,417+0,208	8,93	85,38	14,62
-0,208+0,147	4,02	89,40	10,60
-0,147+0,074	10,60	100,00	0,00
Total	100,00	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 43 – Distribuição granulométrica da moagem (15 min)

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	5,13	5,13	94,87
-3,327+1,651	32,65	37,78	62,22
-1,651+0,833	15,80	53,58	46,42
-0,833+0,417	10,35	63,93	36,07
-0,417+0,208	9,38	73,31	26,63

-0,208+0,147	5,84	79,15	20,85
-0,147+0,074	20,85	100,00	0,00
Total	100,00	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 44 – Distribuição granulométrica da moagem (30 min)

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	6,03	6,03	93,97
-3,327+1,651	26,99	33,02	66,98
-1,651+0,833	11,15	44,17	55,83
-0,833+0,417	8,03	52,20	47,80
-0,417+0,208	8,77	60,97	39,03
-0,208+0,147	7,78	68,75	31,25
-0,147+0,074	31,24	99,99	0,01
Total	99,99	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 45 – Distribuição granulométrica da moagem (45 min)

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	4,72	4,72	95,28
-3,327+1,651	23,51	28,23	71,77
-1,651+0,833	8,80	37,03	62,97
-0,833+0,417	5,65	42,68	57,32
-0,417+0,208	7,73	50,41	49,59
-0,208+0,147	7,95	58,36	41,64
-0,147+0,074	41,63	99,99	0,01
Total	99,99	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 46 – Distribuição granulométrica da moagem (60 min)

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	3,43	3,43	96,57
-3,327+1,651	19,81	23,24	76,76
-1,651+0,833	6,62	29,86	70,14
-0,833+0,417	4,46	34,32	65,68
-0,417+0,208	6,80	41,12	58,88
-0,208+0,147	8,17	49,29	50,71
-0,147+0,074	50,71	100,0	0,00
Total	100,0	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 47 – Distribuição granulométrica da moagem (75 min)

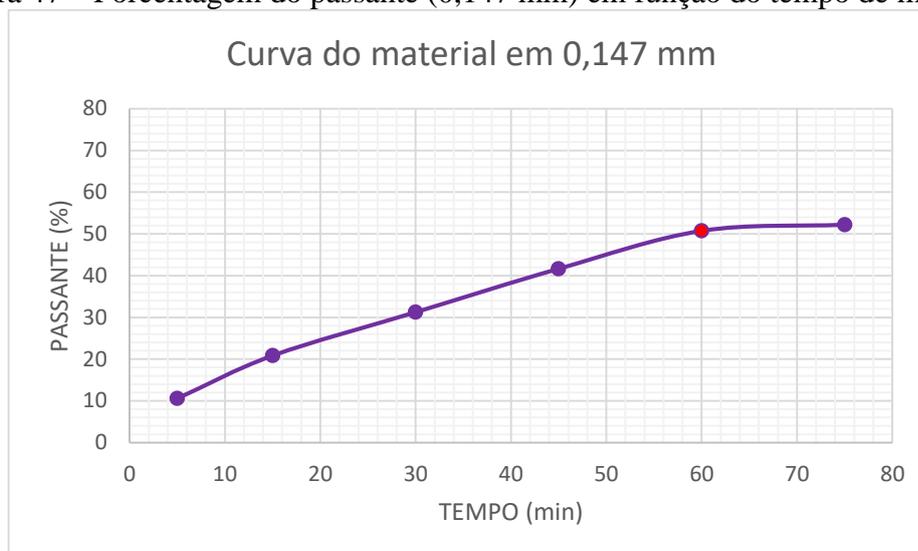
Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	2,50	2,50	97,50
-3,327+1,651	17,77	20,27	79,73
-1,651+0,833	4,34	24,61	75,39
-0,833+0,417	1,27	26,58	34,69
-0,417+0,208	4,77	31,35	42,17
-0,208+0,147	10,28	41,63	52,18
-0,147+0,074	58,36	99,99	0,00
Total	99,99	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Para moagem de 5 minutos, observa-se que o material passante na abertura de 0,147 mm foi de 10,60 % (Tabela 42). Já na moagem de 30 min, tem-se um aumento de 10,60 % para 31,25 % de material passante em 0,147mm (Tabela 44). No tempo de moagem de 45 min, apresenta um aumento nessa mesma abertura de 31,25 % para 41,64 % (Tabela 45). E com um tempo de 60 min, foi identificado que a percentagem do passante em 0,147 é de 50,71%, aumentando para 52,18 % em um tempo de moagem de 75 min (Tabela 47).

Também é observado que aumentando o tempo de moagem, também aumenta a percentagem do passante em 0,147 mm. Assim, para os tempos de 5, 15, 30, 45, 60 e 75 min, as percentagens do passante foram 10,60; 20,85; 31,25; 41,64; 50,71; 52,18 %, respectivamente (Figura 47).

Figura 47 – Porcentagem do passante (0,147 mm) em função do tempo de moagem



Fonte: Autoria própria (2023)

Alimentação do moinho com partículas $\leq 5,0$ mm e carga de enchimento de 40% e velocidade de operação de 100 rpm

A seguir é apresentado as Tabelas 48, 49, 50, 51, 52 e 53, que se refere a distribuição granulométrica para o ensaio de moagem com alimentação de tamanho de partículas $\leq 5,00$ mm.

Tabela 48 – Distribuição granulométrica da moagem (5 min)

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	8,85	8,85	91,15
-3,327+1,651	39,04	47,89	52,11
-1,651+0,833	17,82	65,71	34,29
-0,833+0,417	11,70	77,41	22,59
-0,417+0,208	9,05	86,46	13,54
-0,208+0,147	4,11	90,57	9,43
-0,147+0,074	9,43	100,00	0,00
Total	100,00	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 49 – Distribuição granulométrica da moagem (15 min)

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
--------------	------------	---------------	--------------

+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	5,97	5,97	94,03
-3,327+1,651	30,05	36,02	63,98
-1,651+0,833	13,80	49,82	50,18
-0,833+0,417	11,13	60,95	39,05
-0,417+0,208	12,07	73,02	26,98
-0,208+0,147	6,68	79,70	20,30
-0,147+0,074	20,30	100,00	0,00
Total	100,00	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 50 – Distribuição granulométrica da moagem (30 min)

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	5,60	5,60	94,40
-3,327+1,651	25,72	31,32	68,68
-1,651+0,833	9,53	40,85	59,15
-0,833+0,417	7,80	48,65	51,35
-0,417+0,208	11,11	59,76	40,24
-0,208+0,147	8,63	68,39	31,61
-0,147+0,074	31,61	100,00	0,00
Total	100,00	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 51 – Distribuição granulométrica da moagem (45 min)

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	3,52	3,52	96,48
-3,327+1,651	20,68	24,20	75,80
-1,651+0,833	8,00	32,20	67,80
-0,833+0,417	6,31	38,51	61,49
-0,417+0,208	10,31	48,82	51,18
-0,208+0,147	10,50	59,32	40,68
-0,147+0,074	40,68	100,00	0,00
Total	100,00	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 52 – Distribuição granulométrica da moagem (60 min)

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
---------------------	-------------------	----------------------	---------------------

+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	3,26	3,26	96,74
-3,327+1,651	18,92	22,18	77,82
-1,651+0,833	6,02	28,20	71,80
-0,833+0,417	4,30	32,50	67,50
-0,417+0,208	8,92	41,42	58,58
+0,208+0,147	10,57	51,99	48,01
-0,147+0,074	48,00	99,99	0,01
Total	99,99	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 53 - Distribuição granulométrica da moagem (75 min)

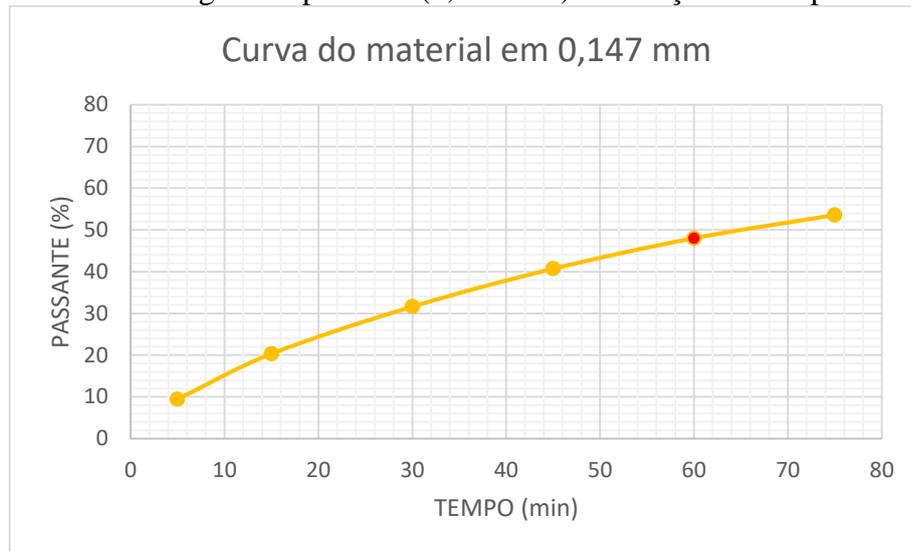
Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
+5,660	0,00	0,00	100
-5,660+3,327	4,08	4,08	95,92
-3,327+1,651	18,14	22,22	77,78
-1,651+0,833	5,18	27,40	72,60
-0,833+0,417	3,28	30,68	69,32
-0,417+0,208	6,49	37,17	62,83
-0,208+0,147	53,56	46,43	53,57
-0,147+0,074	40,68	99,99	0,01
Total	99,99	-	-

Fonte: Autoria própria (2023)

Para moagem de 5 minutos, observa-se que o material passante na abertura de 0,147 mm foi de 9,43 % (Tabela 48). Já na moagem de 30 min, tem-se um aumento de 9,43 % para 31,61 % de material passante em 0,147mm (Tabela 50). No tempo de moagem de 45 min, apresenta um aumento nessa mesma abertura de 31,61 % para 40,68 % (Tabela 51). E com um tempo de 60 min, foi identificado que a percentagem do passante em 0,147 é de 48,61%, aumentando para 53,57 % em um tempo de moagem de 75 min (Tabela 53).

Também é observado que aumentando o tempo de moagem, também aumenta a percentagem do passante em 0,147 mm. Assim, para os tempos de 5, 15, 30, 45, 60 e 75 min, as percentagens do passante foram 09,43; 20,30; 31,61; 40,68; 48,01; 53,57 %, respectivamente (Figura 48).

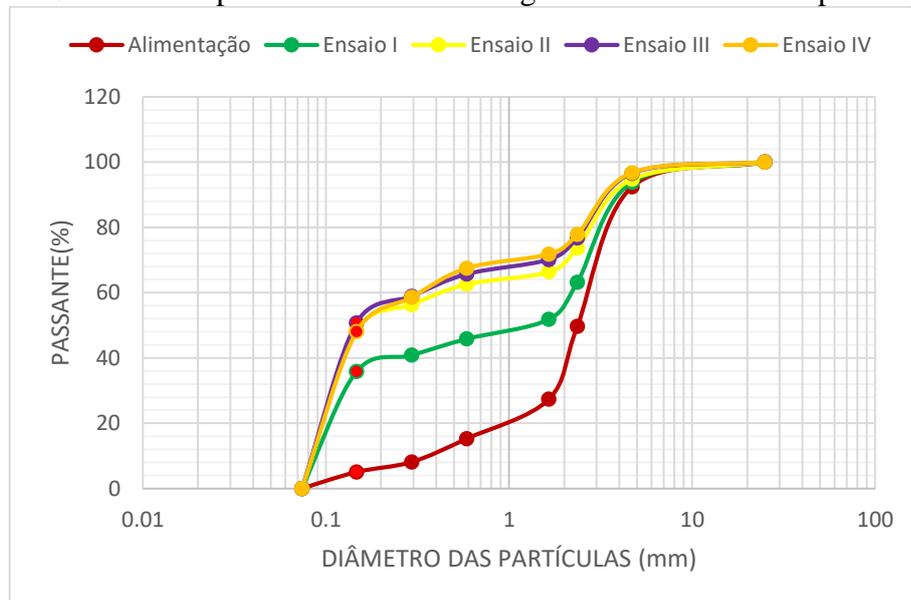
Figura 48 - Porcentagem do passante (0,147 mm) em função do tempo de moagem



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 49 é apresentado um resumo de todos os ensaios de moagem obtidos para o tempo de 60 min em laboratório, e feita uma comparação entre a porcentagem de material passante e o tamanho granulométrico das partículas.

Figura 49 - Material passante em cada faixa granulométrica em tempo de 60 min



Fonte: Autoria própria (2023)

Ao analisar a Figura 48 é possível identificar que os ensaios I, II, III e IV apresentam:

- A curva granulométrica do material (resíduo) da alimentação dos ensaios de moagem possui cerca de 92% das partículas com tamanhos menor de 5,0 mm, esse valor representa menos da metade do tamanho das partículas utilizadas em escala industrial;

- As curvas de distribuição granulométricas dos ensaios de moagem situam-se a esquerda da curva de alimentação, mostrando que o processo de moagem em laboratório possibilita uma redução granulométrica do material pesquisado.
- O ensaio I apresenta na curva de distribuição granulométrica cerca de 35,89% de material passante em 0,147 mm, que é a faixa granulométrica alvo desse estudo. Já a curva de distribuição granulométrica do ensaio II, demonstra um valor de 48,4% de material passante em 0,147 mm. Nesse caso, temos um crescimento de material na ordem de 12,51% na faixa granulométrica analisada. E essa melhoria é atribuída ao aumento da carga de enchimento de 35% para 40%.
- O ensaio III tem uma curva de distribuição granulométrica no qual apresenta aproximadamente 50,71% de material passante em 0,147 mm. Já o ensaio IV possui uma curva de distribuição granulométrica de 48,01% de material passante em 0,147 mm. Nesta situação, não ocorreu crescimento, e sim uma diminuição da ordem de 2,7% na faixa granulométrica analisada. Neste caso, o aumento na carga de enchimento, quando usado a velocidade de rotação de 100 rpm, não significa melhorias de percentual de material no tamanho de 0,147 mm.

4.4 PROCESSO DE MOAGEM NA MINERAÇÃO ANTÔNIO FLORENTINO LTDA

Uma etapa importante da apresentação dos resultados, são as informações provenientes das visitas as unidades de beneficiamento de pegmatitos da região do município de Pedra Lavrada – PB. A seguir são apresentados os dados coletados, para posteriormente ser realizado uma comparação com as informações dos ensaios de moagem em laboratório.

As visitas as empresas da região da Província Pegmatítica da Borborema, que trabalham com moagem, permitiram coletar informações sobre os dados operacionais, como: dimensões do moinho de seixos, o tipo de meio moedor, tamanho dos corpos moedores e seu peso (Tabela 54). Assim, foi possível realizar um levantamento sobre os resultados da moagem em escala industrial do moinho de seixos da unidade de beneficiamento Antônio Florentino, situada no município de Pedra Lavrada – PB. (Tabela 55).

Tabela 54 - Dados operacionais coletados do moinho de seixos

Carga de enchimento	Tipo de meio moedor	Diâmetro (mm/pol)		Peso (Kg)
		127	5	-
50%	Calcedônia	203	8	-
	(45%)	19	3/4	-
Total				3.000

Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 55 - Dados coletados referentes à moagem na Mineração Florentino.

Alimentação Silo (kg)	Alimentação Moinho (kg)	Carga de Enchimento (kg)		Realização Moagem		
		Corpo moedor	minério	T(h)	P(kg)	0,15 mm
14.000	1.300	45%	55%	1	520	40%

Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 54 apresenta que o moinho da respectiva empresa opera com cerca de 50% da capacidade do volume útil, utilizando 45% de meio moedor e 55% de minério. Observa-se também que este equipamento é alimentado através de um silo, que tem capacidade para armazenar cerca de 14.000 kg. Como resultado do processo de moagem é obtido em média 520 kg/h de quartzo, na granulometria de 0,147 mm. A princípio é possível verificar através da Tabela 22 (Distribuição granulométrica da saída do moinho de seixos), que o moinho de seixos (operando em condições ótimas) atualmente, consegue uma redução granulométrica de 40% na malha 0,147 mm, em relação a sua alimentação (1300 kg/h).

No caso dos ensaios de moagem em laboratório, foram obtidos resultados distintos para a percentagem de material passante em 0,147 mm (malha 100). Para os ensaios com granulometria de alimentação de 5,0 mm, 70 rpm e alteração na carga de enchimento (35 e 40%), as percentagens passantes em 0,147 mm foi de 35,80% e 48,40%. Quando se altera as variáveis operacionais, da velocidade de operação de 70 rpm para 100 rpm, tem-se as percentagens passantes em 0,174 mm, de 50,71% e 48,01%. Ao comparar os resultados obtidos em laboratório com os dados operacionais coletados na unidade de beneficiamento, podemos constatar que os valores (48,01% e 50,71%) passante na malha (0,147 mm) desejada são bem interessantes. Isso significa que o processo de moagem na indústria carece por melhorias, e existe a possibilidade de implementar ajustes nas variáveis operacionais do processo de moagem dos pegmatitos.

4.4.1 Dimensionamento do moinho de seixos

Para o dimensionamento do moinho de seixos, se faz necessário determinar a energia necessária para a moagem do minério pegmatítico. Assim sendo, foi usado o método de Bond.

O método de Bond baseia-se na equação (17) por ele desenvolvida e no valor de Índice de Trabalho - WI (Tabela 28). A Lei de Bond é largamente empregada através da seguinte equação:

$$E = 10 \text{ WI} \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)$$

Onde:

E = Energia necessária para moagem de uma tonelada curta (*short ton*, $st = 907$ kg) do minério em estudo; KWh/st;

WI = Índice de trabalho; KWh/st;

P_0 = Granulometria do produto no qual 80% passam numa determinada peneira de referência; em μm .

F = Granulometria da alimentação no qual 80% passa numa determinada peneira de referência; em μm .

A seguir serão apresentadas as informações, que são consideradas fundamentais para definir a energia correta para o processo de moagem e as dimensões do equipamento.

A amostra que será usada no processo de moagem é o resíduo da lavra de pegmatitos (quartzo leitoso); 5,0 ton/h em circuito fechado com hidrociclone pneumático; índice de trabalho (WI) = 15,9; alimentação (F) de $\leq 5,0$ mm ou $5.000 \mu\text{m}$; e produto (P) $\leq 0,074$ mm ou $\leq 74 \mu\text{m}$ (≤ 100 malhas).

O material da alimentação do moinho é proveniente de uma peneira inclinada que recebe material da britagem secundária.

Cálculo da energia (equação 17):

$$E = 10 \text{ WI} \left(\frac{1}{\sqrt{74}} - \frac{1}{\sqrt{5.000}} \right) = \frac{10 \text{ WI}}{\sqrt{P}} - \frac{10 \text{ WI}}{\sqrt{F}} = \frac{10 \times 15,9}{\sqrt{74}} - \frac{10 \times 15,9}{\sqrt{5.000}} = 16,24 \text{ kwh/st}$$

A determinação dos Fatores modificadores será realizada a seguir:

$EF_1 = 1,3$ (fator que corrige o tipo de moagem, no caso moagem a seco)

$EF_2 =$ só se aplica para o caso de circuito aberto, que não seria o caso.

$EF_3 =$ fator que corrige o diâmetro do moinho, só se determina após escolha preliminar do moinho.

$EF_4 =$ fator que corrige a alimentação com tamanho excessivo

$$R_r = \text{razão de redução} = \frac{F}{P} = \frac{5.000}{74} = 67,56$$

$F_0 = 4.000 \sqrt{\frac{13}{\text{WI}}} = 4.000 \sqrt{\frac{13}{15,9}} = 3.615,52 \mu\text{m}$, como $F > F_0$, sendo F_0 tamanho ótimo da alimentação e $F = 5.000 \mu\text{m}$, então se usa EF_4 .

$$EF_4 = \frac{R_r + (\text{WI} - 7) \times (F - \frac{F_0}{F_0})}{R_r} = \frac{67,56 + (15,9 - 7) \times (5.000 - \frac{3.615,52}{3.615,52})}{67,56} = 1,05$$

$EF_5 =$ fator que corrige finura, no caso não se aplica, usado apenas para moagem de partículas extremamente finas, inferiores a 325 malhas (0,044 mm).

EF_6 = não se aplica (fator que corrige a razão de redução para moinho de barras)

EF_7 = fator que corrige a razão de redução no moinho de bolas, é dada por:

$$EF_7 = \frac{Rr-1,22}{Rr-1,35} = \frac{67,56-1,22}{67,56-1,35} = 1,0$$

EF_8 = não se aplica (fator que corrige a ineficiência dos moinhos de barras)

A seguir define-se o valor da energia usando os fatores de correção, inicialmente fazendo-se as conversões de unidades.

Conversão de tonelada curta “short tonnage” para tonelada métrica: Fator = 1,102

Conversão de kw para HP: Fator = 1,341

Tem-se que o consumo de energia (E) será:

$E = 16,24 \text{ kwh/ st}$, fazendo-se as devidas conversões.

$E = 16,24 \times 1,102 \times 1,341 = 24,0 \text{ HP.t/h}$ e para 5,0 t/h, tem-se

$E = 24,0 \times 5,0 = 120,0 \text{ HP}$

Multiplicando-se pelos fatores de correção EF_1 , EF_4 e EF_7 , tem-se

$E = 120,0 \times 1,3 \times 1,05 \times 1,0 = 163,8 \text{ HP}$ de potência.

A seguir foi consultada a Tabela 14 e foi selecionado um moinho de 2,44 x 2,44 m, de diâmetro nominal e comprimento nominal, respectivamente, com uma porcentagem de enchimento de 40 % do seu volume, e com potência do motor de 228 HP. Em seguida pode-se calcular EF_3 :

$$EF_3 = (8/D)^{0,2} = (8/7,5)^{0,2} = 1,01$$

Onde D é o diâmetro interno ao revestimento em polegadas.

Então, a potência corrigida por esse fator será:

$E \text{ corrigida} = 163,8 \times 1,01 = 165,44 \text{ HP}$.

Consultando a Tabela 14, foi possível selecionar um moinho que apresenta o tamanho adequado para atender à potência anteriormente determinada. Na Tabela 56 está descrito as características do moinho dimensionado para a unidade de beneficiamento estudada.

Tabela 56 - Características do moinho de seixos selecionado

Diâmetro nominal		Comprimento nominal		Velocidade de operação do moinho			Potência (HP) e descarga (%) do moinho			Diâmetro Internos ao revestimento	
m	pés	m	pés	rpm	%Vc	ft/min	35	40	45	m	pés
2,44	8,0	2,44	8,0	21,30	76,1	502	215	228	237	2,29	7,5

Fonte: CHAVES (2003)

Paralelamente foram feitas visitas a unidade de beneficiamento de pegmatitos e coletados informações sobre o moinho de seixos. Na Tabela 57 é apresentada as informações sobre o equipamento de moagem.

Tabela 57 - Características atuais do moinho de seixos Mineração Florentino LTDA

Diâmetro nominal		Comprimento nominal		Velocidade de operação do moinho			Potência (HP) e descarga (%) do moinho			Diâmetro Internos ao revestimento	
m	pés	m	pés	rpm	%Vc	ft/min	35	50	45	m	pés
1,60	5,25	3,50	11,48	150,00	-	-	-	739,74	-	1,43	4,7

Fonte: CHAVES (2003)

Ao determinar a energia do processo de moagem, conseqüentemente é possível definir e sugerir as dimensões corretas do moinho de seixos (Tabela 56), e foi obtido as seguintes medidas: diâmetro nominal de 2,44 m e comprimento nominal de 2,44 m. Atualmente na unidade de beneficiamento, é empregado um moinho com as seguinte medidas: diâmetro nominal de 1,60 m e comprimento nominal de 3,50 m (Tabela 57). Neste caso, constatamos que existe um discrepância entre o equipamento que está realizando a moagem de minerais pegmatíticos e o que foi projetado de forma correta. Também é possível observar, que a energia necessária para as operações de moagem deste material (resíduo da extração), seria menor (228,0 HP – Tabela 56), do que está sendo consumido no presente momento (739,74 HP – Tabela 57) na unidade de beneficiamento pesquisada.

4.4.2 Tamanho máximo dos corpos moedores

A seguir será definido o tamanho dos corpos moedores. A equação (24) abaixo permite determinar o tamanho máximo das bolas a ser empregada:

$$d_{\text{bola}} = \sqrt{\frac{F}{k}} \cdot \sqrt[3]{\frac{WI \times \rho}{\%VC \times \sqrt{D}}}, \text{ onde:}$$

d_{bola} = diâmetro máximo das bolas em mm; $F = 5.000 \mu m$ (Granulometria da alimentação do moinho); $WI = 15,9$ (índice de trabalho, ver Tabela 28); $\rho = 2660 \text{ g/cm}^3$ (massa específica do minério); $\%Vc = 76,1$ (velocidade crítica, ver Tabela 56); $D = 7,5 \text{ ft}$ (diâmetro interno ao revestimento da carcaça, ver Tabela 56); $K = 350$ (fator variável com o tipo de moagem, ver Tabela 15).

$$d_{\text{bola}} = \sqrt{\frac{5.000}{350}} \cdot \sqrt[3]{\frac{15,9 \times 2,66}{76,1 \times \sqrt{7,5}}} = 2,23'' \text{ ou } 56 \text{ mm}$$

Para o moinho de seixos gerar um produto na granulometria almejada é fundamental o uso de seixos com as medidas corretas. A partir da definição do diâmetro máximo das bolas e da Tabela 16, foi possível determinar a percentagem da carga moedora e seus diâmetros (Tabela 58).

Tabela 58 - Tamanho e porcentagens das bolas recomendadas para o moinho de seixos

Diâmetro	2^{''}	1^{1/5''}	1^{''}
%	40	45	15

Fonte: CHAVES (2003)

Na Tabela 59 é apresentado as dimensões do comprimento (L)/diâmetro (D), e tamanho máximo de bolas em relação a granulometria do material que alimenta o moinho de bolas (CHAVES, 2003). E neste caso, o valor de tamanho máximo (56 mm) de bolas obtido, está dentro das especificações recomendadas.

Tabela 59 - Tamanho das bolas do moinho e a relação L/D

F(d_{80}) (mm)	Bola maior (mm)	Bola maior (^{''})	Relação L/D
5 a 10	60 a 90	2,5 a 3,5	1:1 a 1, 25:1
0,9 a 4	40 a 50	2,5 a 2	1, 25:1 a 1, 75:1
Moagem fina Remoagem	20 a 30	3/4 a 1 ^{1/4} _{''}	1, 5:1 a 2, 5:1

Fonte: CHAVES (2003)

A partir das informações do dimensionamento do equipamento de moagem e de outras variáveis foi possível determinar o diâmetro máximo das bolas, e em seguida identificar a composição da carga moedora. Na Tabela 59 observa-se que a alimentação do processo de moagem na granulometria de 5,0 mm, apresenta um tamanho máximo de bolas entre 60 a 90 mm, e esse valor está alinhado com 56 mm obtido em nossa pesquisa. Em relação as corpos moedores usados no processo industrial, foi observado que possuem tamanhos de aproximadamente 100 mm (Figura 50), o dobro do calculado.

Figura 50 – Corpos moedores utilizados no moinho de seixos



Fonte: Autoria própria (2023)

Outra informação importante se refere as dimensões do moinho, em nosso dimensionamento (Tabela 56) tem-se uma relação L/D de 1:1, conforme a alimentação de 5,0 mm (Tabela 59).

4.4.3 Peneiramento

Buscando melhorar a eficiência do processo de moagem, será necessário implementar um peneira vibratória adequada após a britagem secundária.

A peneira será determinada por suas dimensões e por tipo de abertura, seja quadrada, retangular, circular e/ou alongada. Neste caso, é preciso considerar duas condições independentes, a área total da tela (A) e espessura do leito (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Para definição da peneira adequada ao processo usaremos uma alimentação de 8 t/h, abertura da tela de 5,0 mm, 65% do material passante em 5,0 mm, e a operação de peneiramento será a seco. A área da peneira (A) é dada pela equação (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010) abaixo:

$$A = \frac{S}{C d Fm} \quad (25)$$

Onde:

S = Vazão ou fluxo de alimentação, (t/h);

C = Capacidade básica de peneiramento (t/h x 0,9 m²);

$$d = \frac{\text{peso específico aparente do material}}{1.602}; \quad (26)$$

Sendo d: Densidade aparente do material

F_m = Fatores modificadores;

Temos o seguinte:

$S = 5,2$ t/h (quantidade de material passante na alimentação que atravessa a peneira);

$C =$ Capacidade básica, $0,9$ t/h x $0,9$ m² (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010);

$$d = \frac{\text{peso específico aparente do material}}{1.602} = \frac{2600}{1602} = 1,66;$$

A seguir foram determinados os fatores modificadores (F_m):

$F = 0,75$. O Fator de Finos foi determinado por interpolação (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010). Considerando que 25% do material é menor que 2,0 mm.

$E = 1,00$ (95% de eficiência de peneiramento). Considerando-se eficiência máxima de peneiramento (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010);

$D = 1,0$ (Fator de deck, no caso peneira de um deck) (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010);

$B = 1,0$ (abertura da tela com forma quadrada) (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Aplicando na Eq (25) temos:

$$A = \frac{S}{C d F_m} = \frac{5,20 \text{ t/h}}{0,9 \times 1,66 \times 0,75 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,0} = 4,64 \text{ft}^2 = 0,43 \text{ m}^2$$

O valor definido é considerado a área efetiva da peneira, e nesse caso é adicionado 10% para compensar as perdas de área devido aos suportes que sustentam a tela à peneira (LUZ *et al.*, 2010).

Assim, temos $0,43 + 0,043 = 0,473$ m²

Em seguida é feito a seleção da peneira com área de 0,473 m², e razão de comprimento/largura de 2:1 para termos um peneiramento eficiente. Sendo assim, sugere-se uma peneira de 1,0 m x 0,5 m com uma área total de 0,50 m². Ao consultar o manual de britagem da Metso, tem-se que a peneira mais próximas dessas medidas é o modelo M20008/1A (Tabela 60).

Tabela 60 - Especificações técnicas para peneira vibratória inclinada MS

Peneira	N° de decks	Dimensões (mm)	Área do Deck(m²)	Motor (Hp)	Compr. (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)
20008/1A	1	2000x1800	1,6	4	2100	1150	1216
25010/1A	1	2500x1050	2,5	5	2600	1400	1410
30012/1A	2	3000x1200	3,6	12,5	3400	1770	1715

Fonte: METSO (2005)

Em virtude de estarmos dimensionando um equipamento para uma unidade de beneficiamento de pequeno porte, com produção atual de no máximo 2,0 t/h do material

pesquisado, é compreensível a área da tela de $0,5 \text{ m}^2$. Ao comparar a peneira dimensionada com a disponível no Manual da Metso, observa-se que a peneira da Metso é maior. Porém, podemos utilizar realmente a peneira dimensionada, pois, tem-se a perspectiva de aumentar a produção ou solicitar uma adequação conforme a demanda atual. No que se refere a peneira que atualmente funciona (Figura 51) na unidade de beneficiamento, a mesma apresenta medidas de 2,70 m de comprimento e 1,0 m de largura e abertura de 15 mm.

Figura 51 – Peneira inclinada de dois deques usada após a britagem secundária



Fonte: Autoria própria (2023)

É importante para o dimensionamento da peneira a determinação da condição de altura do leito no ponto de descarga do oversize. Para termos um peneiramento eficiente, recomenda-se que a espessura do leito não seja maior do que 4 vezes o tamanho da abertura da tela (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010). Assim, temos que para a abertura de 5,0 mm, a espessura do leito não pode ser maior que 20,0 mm (CHAVES, 2003).

4.5 CALIBRAÇÃO DO MODELO PARA A MOAGEM

No processo de calibração do modelo do moinho de bolas se fez necessário informar as configurações das variáveis de controle operacional e de projeto, tais como: grau de enchimento, percentual de velocidade crítica, granulometria de alimentação, quantidade de moinho, relação entre comprimento e largura, diâmetro e tipo de descarga do moinho. Na Tabela 61 é apresentado os fatores de controle empregados.

Tabela 61 – Fatores de controle físico do moinho de bolas

Fatores Físicos	Valor
Número de moinhos em paralelo	1
Diâmetro do moinho	1,60 m
Relação comprimento/diâmetro	2,19 m
Grau de enchimento	40%
Densidade corpo moedor	2,6
Percentual velocidade crítica	76,1
Tipo de descarga	Overflow

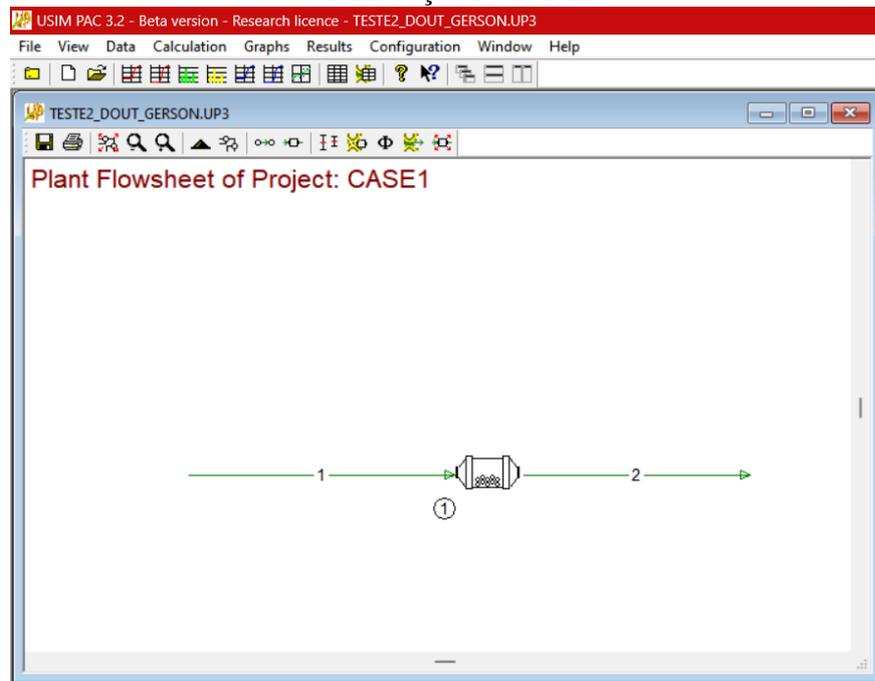
Fonte: Autoria própria (2023).

Para ratificar a calibração realizada, utilizou-se das curvas de distribuições granulométricas da saída do moinho.

4.6 SIMULAÇÃO

Baseado nos dados coletados do circuito de cominuição da unidade de beneficiamento, nos ensaios de laboratórios e no modelo calibrado, foi realizado a simulação. Na Figura 52 é apresentado o fluxograma do equipamento de moagem da Mineração Antônio Florentino usada no software.

Figura 52 - Fluxograma da simulação realizada no USIM PAC do processo de moagem da Mineração Florentino



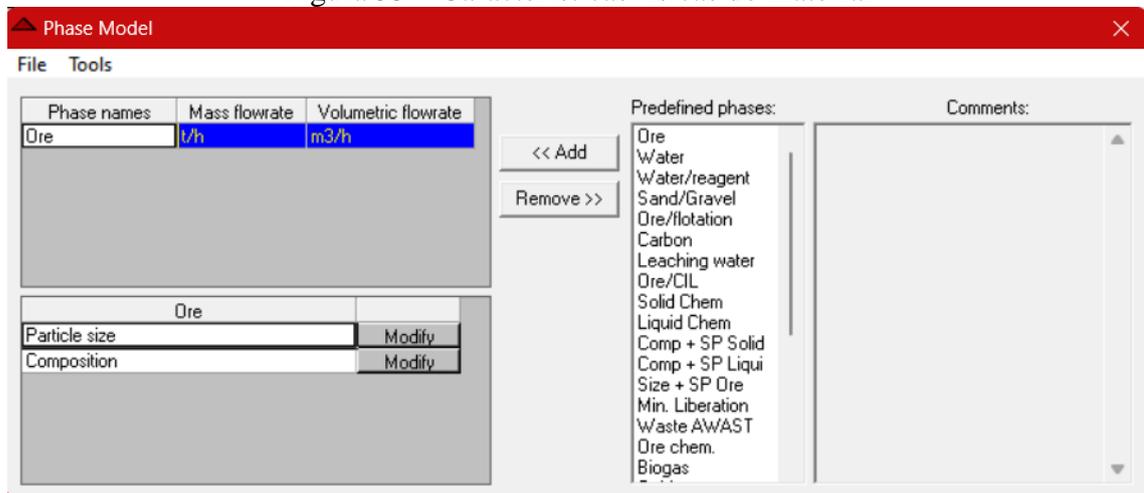
Fonte: Autoria própria (2023)

A primeira etapa da simulação foi realizada considerando as seguintes variáveis operacionais do moinho de seixos: alimentação do moinho com partículas $\leq 5,0$ mm, carga de

enchimento de 35% e velocidade de operação de 70 rpm. Na segunda etapa, foram usadas: alimentação do moinho com partículas $\leq 5,0$ mm, carga de enchimento de 40% e velocidade de operação de 70 rpm. A terceira etapa foi empregada: alimentação do moinho com partículas $\leq 5,0$ mm e carga de enchimento de 35% e velocidade de operação de 100 rpm. Já a quarta etapa foi utilizado: alimentação do moinho com partículas $\leq 5,0$ mm e carga de enchimento de 40% e velocidade de operação de 100 rpm. E por fim, foi realizado uma simulação usando os dados empíricos, resultante dos cálculos matemáticos.

Inicialmente foram definidas as características físicas do material (Figura 53) para ser submetido a simulação. Nessa etapa imputamos os dados obtidos nos ensaios de classificação granulométrica, do material que alimenta o moinho de seixos na indústria em “*Particle Size*”.

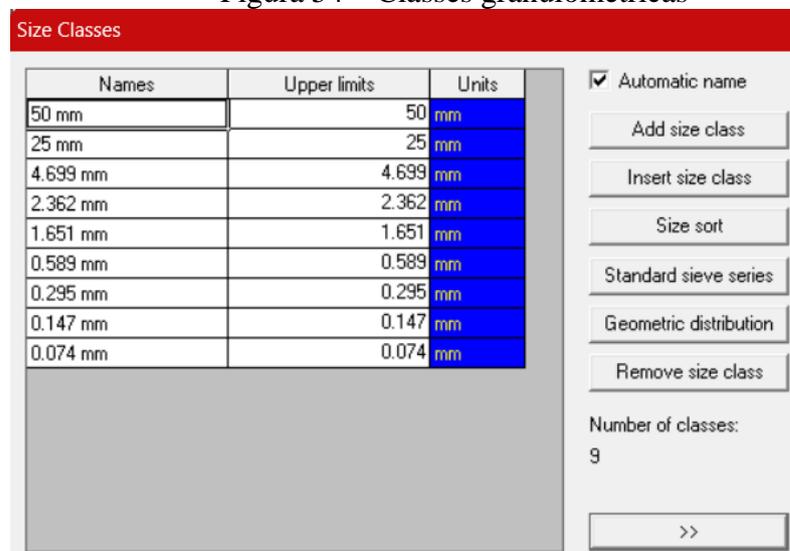
Figura 53 – Características físicas do material



Fonte: Autoria própria (2023)

Em seguida adicionamos as classes granulométricas (Figura 54) que foram utilizadas anteriormente nos ensaios em laboratório.

Figura 54 – Classes granulométricas



Fonte: Autoria própria (2023)

Além disso, em “*Composition*” indicamos a composição química do minério, discriminando suas fases minerais e respectivas densidades, entretanto como o minério em questão trata-se de quartzo puro, utilizamos apenas uma fase mineral.

Também se faz necessário inserir os valores de retido (Figura 55), obtidos através do ensaio de classificação granulométrica do material (o próprio software faz o balanço de massa), além da taxa de alimentação do moinho em escala industrial.

Figura 55 – Valores do retido da análise granulométrica da alimentação do moinho

The screenshot shows a software window titled 'TESTE2_DOUT_GERSON.UP3:2'. It displays a table for 'Ore' with the following data:

Property	Value	Unit
Mass flowrate	1.28	t/h
Volumetric flowrate	0.483019	m ³ /h
Density	2.65	kg/dm ³

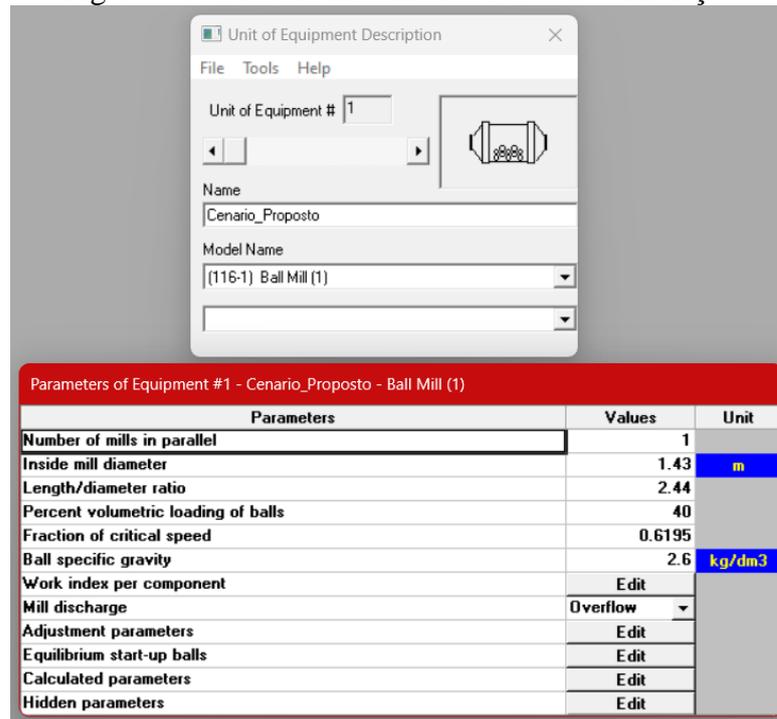
Below this, a 'Component grade per size' table is shown, detailing the size distribution of the ore. The table includes columns for 'Size classes', '% Individual', '% Passing', '% Retained', and '%'. The data is as follows:

Size classes	% Individual	% Passing	% Retained	%
50 mm	5.73	100	0	100
25 mm	69.27	94.27	5.73	100
4.699 mm	14.46	25	75	100
2.362 mm	4.66	10.54	89.46	100
1.651 mm	4	5.88	94.12	100
0.589 mm	0.8	1.88	98.12	100
0.295 mm	0.4	1.08	98.92	100
0.147 mm	0.67	0.68	99.32	100
0.074 mm	0.01	0.01	99.99	100
Means				100

Fonte: Autoria própria (2023)

Após essa configuração, o modelo matemático (Figura 56) que será utilizado na simulação é escolhido e as variáveis necessárias para rodar a simulação são imputadas.

Figura 56 – Modelo matemático usado na simulação



Fonte: Autoria própria (2023)

Para os diversos casos simulados, o propósito foi verificar a aderência com os resultados obtidos da moagem em laboratório, avaliar a real possibilidade de ganhos na produção de material passante em 0,147 mm (malha 100), e definir um fluxograma coerente com a metodologia empregada.

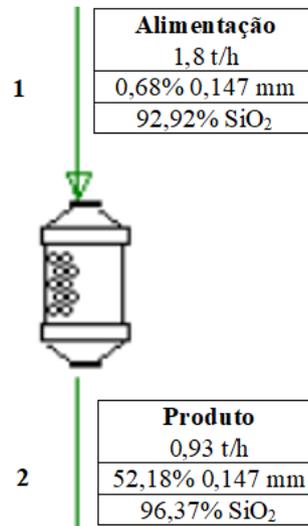
4.6.1 Cenário I

Alimentação do moinho com partículas $\leq 5,0$ mm, carga de enchimento de 35% e velocidade de operação de 70 rpm.

Na Figura 57 é apresentado o fluxograma referente ao primeiro resultado do cenário da simulação. Nessa figura é possível observar as informações de alimentação do moinho e os dados de distribuição granulométrica do processo de simulação, para uma vazão de alimentação de 1,28 t/h.

Figura 57 – Fluxograma do Cenário I

Alimentação (%)	Produto (%)
Passante em 0,295 mm - 1,88	Passante em 0,295 mm - 87,63
Passante em 0,147 mm - 1,08	Passante em 0,147 mm - 52,18
Passante em 0,074 mm - 0,68	Passante em 0,074 mm - 23,23



Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 58 apresenta-se os resultados da distribuição granulométrica referente ao primeiro cenário de simulação. Essa figura demonstra a distribuição granulométrica do material considerado resíduo, simulado no equipamento de moagem. O processo foi realizado para um circuito aberto com a granulometria de alimentação do moinho < 15,0 mm.

Figura 58 – Resultado da distribuição granulométrica do Cenário I

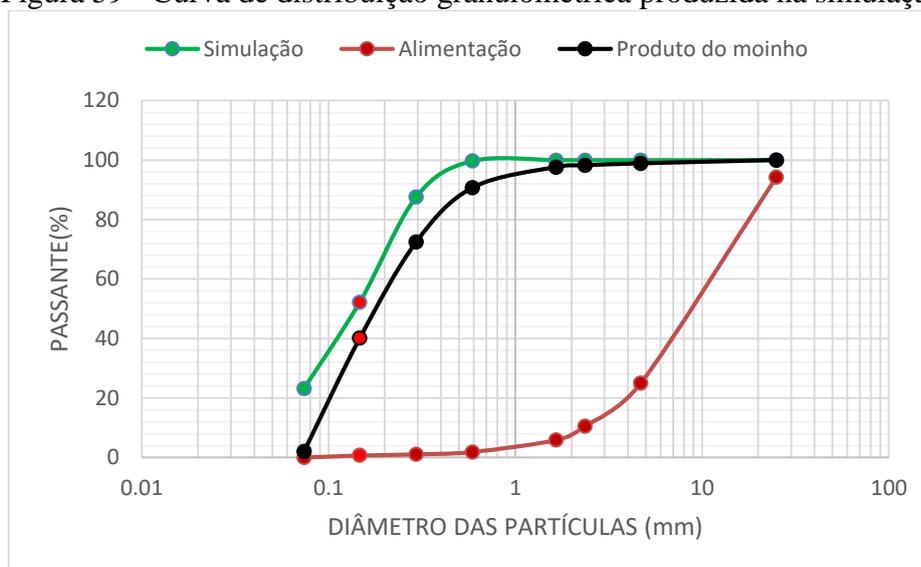
Ore		Components	
Mass flowrate	1.28	t/h	
Volumetric flowrate	0.483019	m ³ /h	
Density	2.65	kg/dm ³	
Component grade per size			Ore
Size classes	% Individual	% Passing	%
50 mm	0	100	100
25 mm	0	100	100
4.699 mm	0	100	100
2.362 mm	0	100	100
1.651 mm	0.280596	100	100
0.589 mm	12.0881	99.7194	100
0.295 mm	35.4505	87.6313	100
0.147 mm	28.947	52.1808	100
0.074 mm	23.2337	23.2337	100
Means			100

Fonte: Autoria própria (2023).

Ao analisar o circuito da unidade de beneficiamento desta pesquisa, temos que o produto (P₈₀) passante em 0,147 mm corresponde a 40,0% da alimentação. É uma percentagem de produção satisfatória no momento, mas com valores inferiores aos obtidos em ensaios de laboratório.

A Figura 58 representa a tela do processo final da simulação, e nela podemos verificar que a simulação da moagem apresentou um produto (P_{80}) passante em 0,147 mm de 52,18%. Esse valor obtido possui uma maior concentração de material na malha (0,147 mm) desejada, em relação ao que se obtém hoje na unidade de beneficiamento. Essa melhoria se dá pela escolha de variáveis que influênciam positivamente a realização do processo de moagem. Na Figura 59 é apresentado o gráfico das curvas de simulação do cenário I, da saída do moinho e de sua alimentação.

Figura 59 - Curva de distribuição granulométrica produzida na simulação



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 59 podemos observar a curva de distribuição granulométrica do material da alimentação do moinho que está entre 0,1 e 25,0 mm. Essa curva mostra que as partículas menores estão entre 0,1 e 1,0 mm e representam apenas cerca de 5% do material que compõem a alimentação. Já as partículas maiores do material da alimentação estão entre 1,0 e 10,0 mm (55%) e entre 10 e 25,0 mm (40%).

Também é apresentado a curva de distribuição granulométrica da saída (descarga) do moinho de seixos. Nessa curva, temos que as menores partículas (0,074 a 0,589 mm) representam cerca de 95%, e as maiores (>1,0 mm) aproximadamente 5%. No que se refere a faixa de interesse da pesquisa, temos que 40,09% do material é passante na malha de 0,147 mm, em relação ao total da alimentação (1300kg).

Nessa mesma figura temos a curva de distribuição granulométrica da simulação referente ao produto da moagem (após o classificador pneumático), que também está entre 0,1 e 25,0 mm. Nessa curva tem-se que as partículas menores estão entre 0,1 e 1,0 mm e representam cerca de 100% do material. Também observa-se que não existe partículas retidas entre 1,0 mm e 25,0 mm, sendo 100% passante nessa faixa de aberturas.

Neste caso, ao fazer a comparação entre as curvas de alimentação da moagem, da descarga do moinho e do cenário I da simulação, é possível verificar uma redução significativa do material. Partindo de 0,68% para 40,09% e finalizando em 52,18% na granulometria de 0,147 mm, que é foco dos estudos.

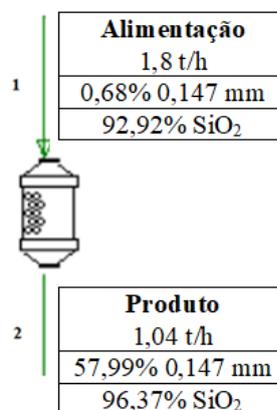
4.6.2 Cenário II

Alimentação do moinho com partículas $\leq 5,0$ mm, carga de enchimento de 40% e velocidade de operação de 70 rpm.

Na Figura 60 é apresentado o fluxograma referente ao segundo resultado do cenário da simulação. Nessa figura é possível observar as informações de alimentação do moinho e os dados de distribuição granulométrica do processo de simulação, para uma vazão de alimentação de 1,28 t/h.

Figura 60 - Fluxograma do Cenário II

Alimentação (%)	Produto (%)
Passante em 0,295 mm - 1,88	Passante em 0,295 mm - 91,43
Passante em 0,147 mm - 1,08	Passante em 0,147 mm - 57,99
Passante em 0,074 mm - 0,68	Passante em 0,074 mm - 26,72



Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 61 apresenta-se os resultados da distribuição granulométrica referente ao segundo cenário de simulação. Essa figura demonstra a distribuição granulométrica do material considerado resíduo, simulado no equipamento de moagem. O processo foi realizado para um circuito aberto com a granulometria de alimentação do moinho $< 15,0$ mm.

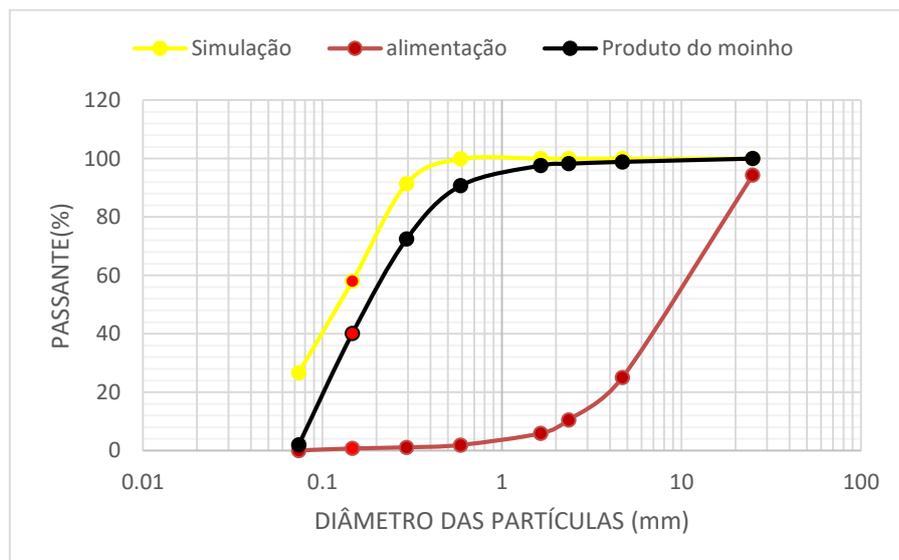
Figura 61 - Resultado da distribuição granulométrica do Cenário II

Ore				Components	
Mass flowrate	1.28	t/h			
Volumetric flowrate	0.483019	m3/h			
Density	2.65	kg/dm3			
Component grade per size				Components	
Size distribution				Ore	
Size classes	% Individual	% Passing	% Retained	%	
50 mm	0	100	0	100	
25 mm	0	100	0	100	
4.699 mm	0	100	0	100	
2.362 mm	0	100	0	100	
1.651 mm	0.0998711	100	0	100	
0.589 mm	8.46555	99.9001	0.0998711	100	
0.295 mm	33.437	91.4346	8.56543	100	
0.147 mm	31.2771	57.9975	42.0025	100	
0.074 mm	26.7205	26.7205	73.2795	100	
Means				100	

Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 61 podemos verificar a tela do processo final da simulação, e nela podemos verificar que a simulação da moagem apresentou um produto (P₈₀) passante em 0,147 mm de 57,99%. Esse valor obtido possui uma maior concentração de material na malha (0,147 mm) desejada, em relação a percentagem (40%) que se obtém hoje na unidade de beneficiamento. Essa crescimento é bem significativo e deve-se também a escolha de parâmetros que torna o processo mais eficiente. Na Figura 62 é apresentado o gráfico das curvas de simulação do cenário II, da saída do moinho e de sua alimentação.

Figura 62 - Curva de distribuição granulométrica produzida na simulação



Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 62 podemos observar a curva de distribuição granulométrica do material da alimentação do moinho, onde 5% são partículas menores que 1,0 mm e 95% são maiores.

Também observamos a curva de distribuição granulométrica da saída (descarga) do moinho de seixos, onde 95% das partículas são menores que 1,0 mm e 5% são maiores.

Identificamos também a curva de distribuição granulométrica da simulação da moagem, no qual as partículas menores estão entre 0,1 e 1,0 mm, e representam cerca de 100% do material. Como no caso anterior, não existem partículas retidas entre 1,0 mm e 25,0 mm, sendo 100% passante nessa faixa de aberturas. A principal mudança ocorrida no cenário II, é que as partículas passantes em 0,147 mm são da ordem de 57,99%, apresentando um aumento de aproximadamente 6% em relação ao cenário I.

Sendo assim, ao fazer a comparação entre as curvas de alimentação da moagem, da descarga do moinho e do cenário II da simulação, é possível verificar uma redução significativa do material, e também observa-se uma melhora de material passante em 0,147 mm em relação ao cenário I.

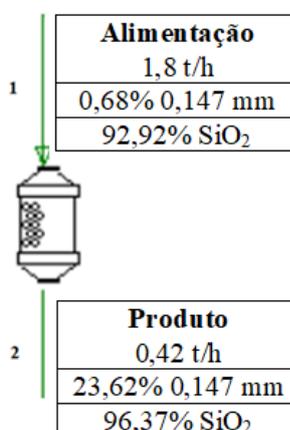
4.6.3 Cenário III

Alimentação do moinho com partículas $\leq 5,0$ mm e carga de enchimento de 35% e velocidade de operação de 100 rpm.

Na Figura 63 é apresentado o fluxograma referente ao terceiro resultado do cenário da simulação. Nessa figura é possível observar as informações de alimentação do moinho e os dados de distribuição granulométrica do processo de simulação, para uma vazão de alimentação de 1,28 t/h.

Figura 63 - Fluxograma do Cenário III

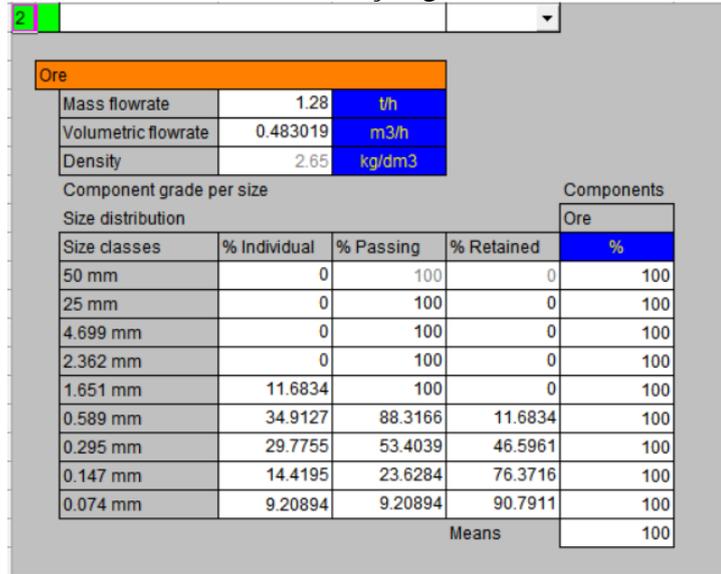
Alimentação (%)	Produto (%)
Passante em 0,295 mm - 1,88	Passante em 0,295 mm - 53,40
Passante em 0,147 mm - 1,08	Passante em 0,147 mm - 23,62
Passante em 0,074 mm - 0,68	Passante em 0,074 mm - 9,20



Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 64 apresenta-se os resultados da distribuição granulométrica referente ao terceiro cenário de simulação. Essa figura demonstra a distribuição granulométrica do material considerado resíduo, simulado no equipamento de moagem. O processo foi realizado para um circuito aberto com a granulometria de alimentação do moinho < 15,0 mm.

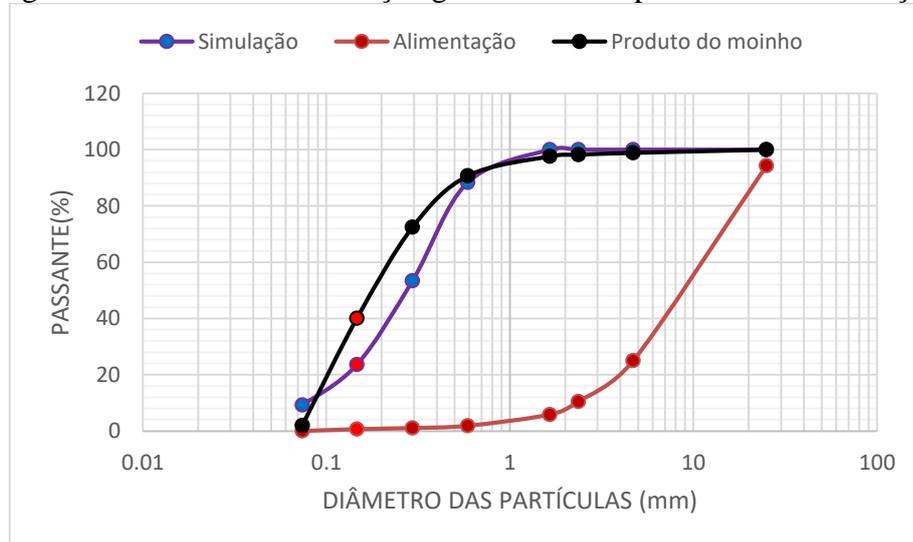
Figura 64 - Resultado da distribuição granulométrica do Cenário III



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 64 podemos verificar a tela do processo final da simulação, e nela podemos verificar que a simulação da moagem apresentou um produto (P₈₀) passante em 0,147 mm de 23,62%. Esse valor obtido possui uma menor concentração de material na malha (0,147 mm) desejada, em relação aos 40% que se obtém hoje na unidade de beneficiamento. Essa ineficiência é consequência da escolha de variáveis não representativas ao processo de moagem. Na Figura 65 é apresentado o gráfico das curvas de simulação do cenário III, da saída do moinho e de sua alimentação.

Figura 65 - Curva de distribuição granulométrica produzida na simulação



Fonte: Autoria própria (2023)

Na respectiva figura a curva da simulação mostra que as partículas menores estão entre 0,1 e 1,0 mm, e representam cerca de 100% do material. E como na simulação II, não existem partículas retidas entre 1,0 mm e 25,0 mm, sendo 100 % passante nessa faixa de aberturas. Nesse processo de simulação III, as partículas passante em 0,147 mm é de cerca de 23,62%. Esse valor apresenta uma diminuição em relação ao cenário II, sendo algo não desejado.

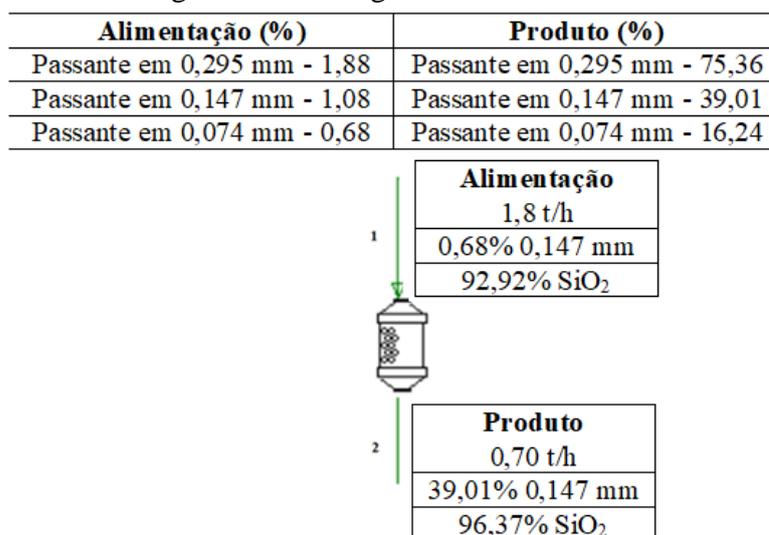
Entretanto, quando comparado as curvas de alimentação da moagem, da descarga do moinho e do cenário III da simulação, é possível visualizar uma diminuição de quase 50% da capacidade de redução granulométrica em 0,147 mm, acarretando em um cenário negativo para o processo de moagem.

4.6.4 Cenário IV

Alimentação do moinho com partículas $\leq 5,0$ mm e carga de enchimento de 40% e velocidade de operação de 100 rpm

Na Figura 66 é apresentado o fluxograma referente ao quarto resultado do cenário da simulação. Nessa figura é possível observar as informações de alimentação do moinho e os dados de distribuição granulométrica do processo de simulação, para uma vazão de alimentação de 1,28 t/h.

Figura 66 - Fluxograma do Cenário IV



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 67 apresenta-se os resultados da distribuição granulométrica referente ao quarto cenário de simulação. Essa tabela demonstra a distribuição granulométrica do material considerado resíduo, simulado no equipamento de moagem. O processo foi realizado para um circuito aberto com a granulometria de alimentação do moinho $< 15,0$ mm.

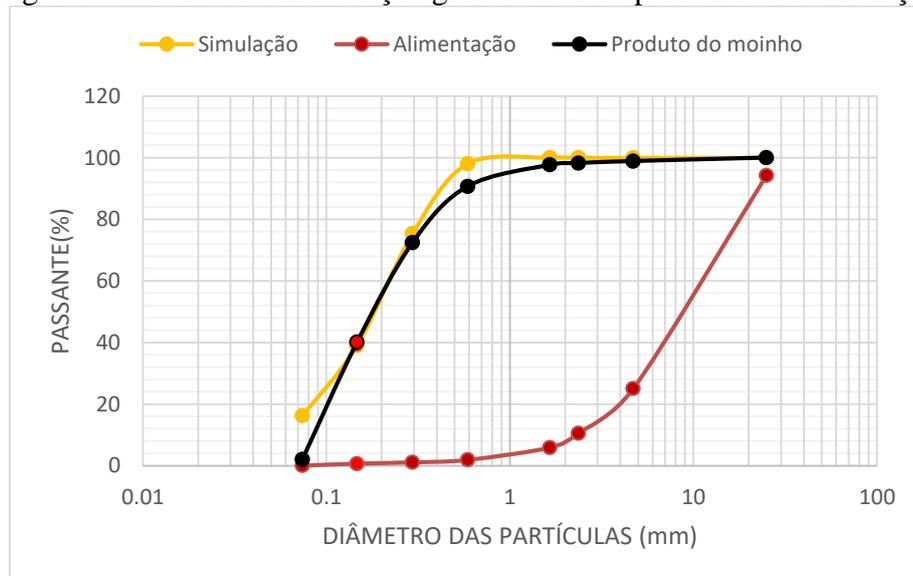
Figura 67 - Resultado da distribuição granulométrica do Cenário IV

Ore				
Mass flowrate	1.28	t/h		
Volumetric flowrate	0.483019	m3/h		
Density	2.65	kg/dm3		
Component grade per size				
Size distribution				
Size classes	% Individual	% Passing	% Retained	Components
50 mm	0	100	0	Ore 100
25 mm	0	100	0	100
4.699 mm	0	100	0	100
2.362 mm	0	100	0	100
1.651 mm	1.94768	100	0	100
0.589 mm	22.6905	98.0523	1.94768	100
0.295 mm	36.35	75.3618	24.6382	100
0.147 mm	22.771	39.0117	60.9883	100
0.074 mm	16.2407	16.2407	83.7593	100
Means				100

Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 67 podemos verificar a tela do processo final da simulação, e nela podemos verificar que a simulação da moagem apresentou um produto (P₈₀) passante em 0,147 mm de 39,01%. Esse valor obtido é igual a concentração de material na malha (0,147 mm) desejada, em relação ao que se produz hoje na unidade de beneficiamento. Essa eficiência equivalente é consequência da escolha de parâmetros semelhantes aos usados na moagem industrial. Na Figura 68 é apresentado o gráfico das curvas de simulação do cenário IV, da saída do moinho e de sua alimentação.

Figura 68 - Curva de distribuição granulométrica produzida na simulação



Fonte: Autoria própria (2023)

Nessa figura é possível identificar que curva da simulação apresenta 100% de material abaixo de 1,0 mm. E igualmente a simulação III, não existem partículas retidas entre 1,0 mm e 25,0 mm, sendo 100 % passante nessa faixa de aberturas. Nesse processo de simulação IV,

temos cerca de 39,01% de partículas passante em 0,147 mm, representando um aumento em relação ao cenário III, que proporciona uma pequena melhoria.

Porém, ao compararmos as curvas de alimentação da moagem, da descarga do moinho e do cenário IV da simulação, verificamos a continuidade de perda da capacidade de redução granulométrica na malha 0,147 mm, mesmo tendo um crescimento em relação ao cenário III.

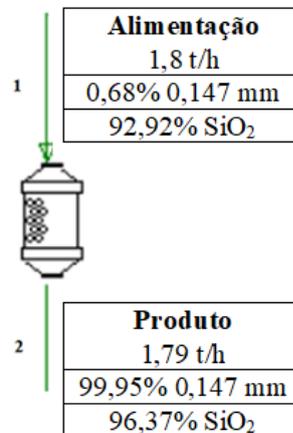
4.6.5 Cenário do moinho redimensionado

Alimentação do moinho com partículas $\leq 5,0$ mm e carga de enchimento de 40% e velocidade de operação de 21,3 rpm (moinho dimensionado matematicamente).

Na Figura 69 é apresentado o fluxograma referente ao quinto resultado do cenário da simulação. Nessa figura é possível observar as informações de alimentação do moinho e os dados de distribuição granulométrica do processo de simulação, para uma vazão de alimentação de 1,28 t/h.

Figura 69 - Fluxograma do moinho ideal

Alimentação (%)	Produto (%)
Passante em 0,295 mm - 1,88	Passante em 0,295 mm - 100
Passante em 0,147 mm - 1,08	Passante em 0,147 mm - 99,95
Passante em 0,074 mm - 0,68	Passante em 0,074 mm - 93,70



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 70 apresenta-se os resultados da distribuição granulométrica referente ao quinto cenário de simulação. Essa figura demonstra a distribuição granulométrica do material considerado resíduo, simulado no equipamento de moagem com as dimensões corretas. O processo foi realizado para um circuito aberto com a granulometria de alimentação do moinho $< 15,0$ mm.

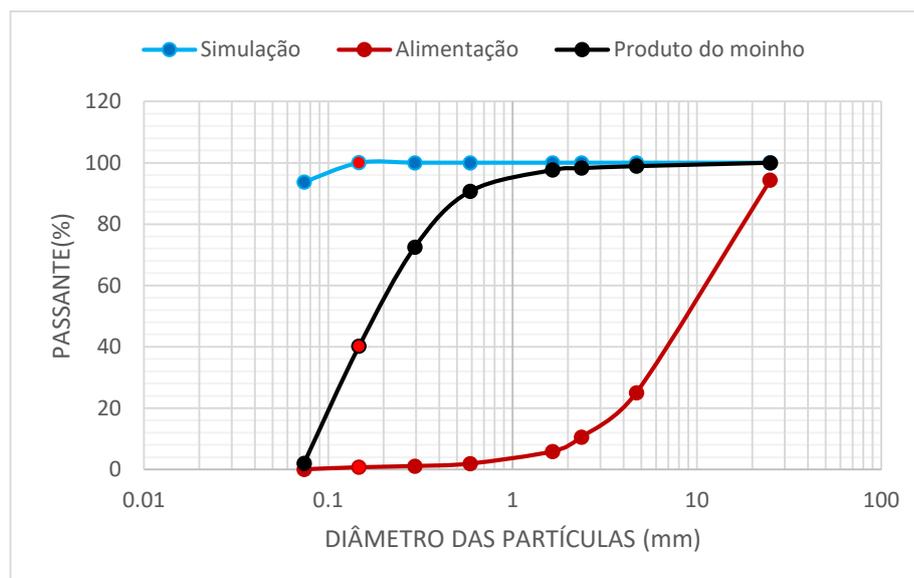
Figura 70 - Resultado da distribuição granulométrica do Cenário V

Ore			
Mass flowrate	1.28	t/h	
Volumetric flowrate	0.483019	m ³ /h	
Density	2.65	kg/dm ³	
Component grade per size			
Size distribution			Components
Size classes	% Individual	% Passing	% Retained
50 mm	0	100	0
25 mm	0	100	0
4.699 mm	0	100	0
2.362 mm	0	100	0
1.651 mm	0	100	0
0.589 mm	0	100	0
0.295 mm	0.0445318	100	0
0.147 mm	6.24897	99.9555	0.0445318
0.074 mm	93.7065	93.7065	6.2935
Means			100

Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 71 podemos verificar a tela do processo final da simulação, e nela podemos verificar que a simulação da moagem apresentou um produto (P₈₀) passante em 0,147 mm de 99,95%. Esse valor obtido apresenta a concentração ideal de material na malha (0,147 mm) desejada. Essa significativa melhoria em relação ao que se obtém hoje na unidade de beneficiamento está associado a utilização dos parâmetros corretos no processo de moagem. Na Figura 70 é apresentado o gráfico das curvas de simulação do cenário V, da saída do moinho e de sua alimentação.

Figura 71 - Curva de distribuição granulométrica produzida na simulação



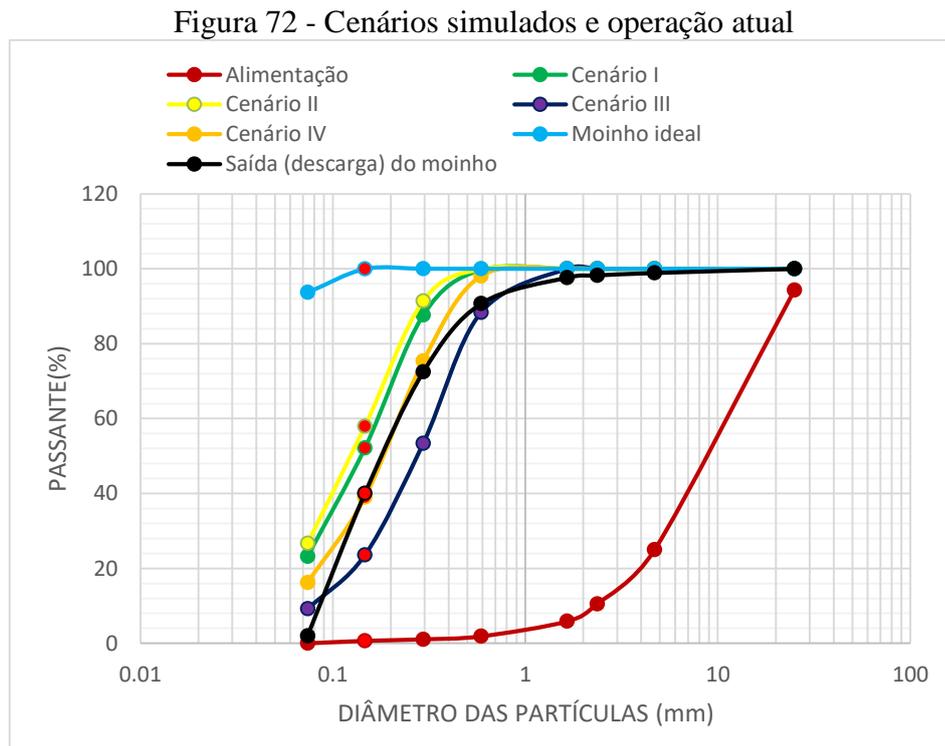
Fonte: Autoria própria (2023).

Na Figura 71 podemos observar que a curva de distribuição granulométrica do material da alimentação do moinho, possui 5% de partículas menores que 1,0 mm e 95% de partículas maiores que 1,0 mm.

Essa mesma figura também apresenta a curva de distribuição granulométrica da simulação da moagem do moinho com dimensões (comprimento x diâmetro) corretas. Nessa curva, tem-se que as partículas menores representam cerca de 100% do material, não existindo partículas acima de 0,295 mm. Esse processo de simulação mostrou que 99,99% do material é passante em 0,147 mm, demonstrando as condições ideais para a operação do moinho.

Nessa condição, ao compararmos as curvas de alimentação da moagem, da descarga do moinho e do cenário do moinho redimensionado, o processo de redução granulométrica em 0,147 mm foi praticamente 100% eficaz.

A seguir na Figura 72 é apresentado um resumo de todos os cenários obtidos da simulação, e feita uma comparação com a operação atual na unidade de beneficiamento analisada.



Fonte: Autoria própria (2023)

Ao avaliar a Figura 72 podemos identificar que os cenários I, II, III e IV apresentam:

- A curva granulométrica do material (resíduo) da alimentação do processo de simulação possui mais de 50% de partículas com tamanhos acima de 10 mm, esse valor representa o dobro do tamanho das partículas utilizadas nos ensaios de moagem em laboratório;

- Todas as curvas de distribuição granulométricas dos processos de simulação situam-se a esquerda da curva de alimentação, mostrando que os cenários obtidos da moagem podem proporcionar boa redução granulométrica do material pesquisado.
- Com exceção do cenário III, todos os outros cenários também estão a esquerda da curva de distribuição granulométrica da descarga do moinho, demonstrando que a simulação pode melhorar a eficiência da moagem, caso seja usadas as variáveis estudadas.
- A medida que são empregados as diversas variáveis no processo de simulação, é gerado cenários distintos para o material passante em 0,147 mm e 0,074 mm;
- O cenário I apresenta uma curva de distribuição granulométrica de 52,18% de material passante em 0,147 mm, que é o objetivo dos estudos realizados. Mas, também consegue apresentar 23,23% de material passante em 0,074 mm, que é uma faixa interessante para o mercado industrial. Já o cenário II possui uma curva de distribuição granulométrica com 57,99% de material passante em 0,147 mm, um crescimento de 5,81% ao aumentar a carga de enchimento. Também temos cerca de 26,72% de material passante em 0,074 mm, com um crescimento de 3,49% em relação ao cenário I. Esse cenário demonstra que a simulação realizada com aumento da carga de enchimento de 35% para 40%, tem crescimento de material em 0,147 mm satisfatório;
- O cenário III possui uma curva de distribuição granulométrica onde a quantidade de material passante em 0,147 mm é de 23,62%, e em 0,074 mm é de 9,20%. Ao observamos o cenário IV, temos cerca de 39,01% de material passante em 0,147 mm e de 16,24% em 0,074 mm. Nessa situação, tem-se um crescimento de 23,62% para 39,01%, que representa aproximadamente 15,39% em 0,147 mm. Nesse caso, vimos que o aumento da carga de enchimento também melhorou o rendimento. Porém, é demonstrado através dos cenários que as melhores condições operacionais para o equipamento de moagem, é vista nos cenário I e II.
- Também é possível observar a curva de distribuição para o equipamento de moagem dimensionado empiricamente. Nesse caso, é visto as melhores condições operacionais do moinho de seixos, sendo capaz de reduzir o material na malha 0,147 mm em quase 100%.

4.7 PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO DO MOINHO DE SEIXOS

Na figura abaixo, é apresentado o equipamento de peneiramento empregado no processo de moagem para os minerais de quartzo e feldspato pegmatítico na unidade de beneficiamento Antônio Florentino. É possível visualizar na Figura 73 a peneira de dois deques e suas respectivas saídas para os retidos da primeira e segunda tela.

Figura 73 - Peneira utilizada após a britagem secundária



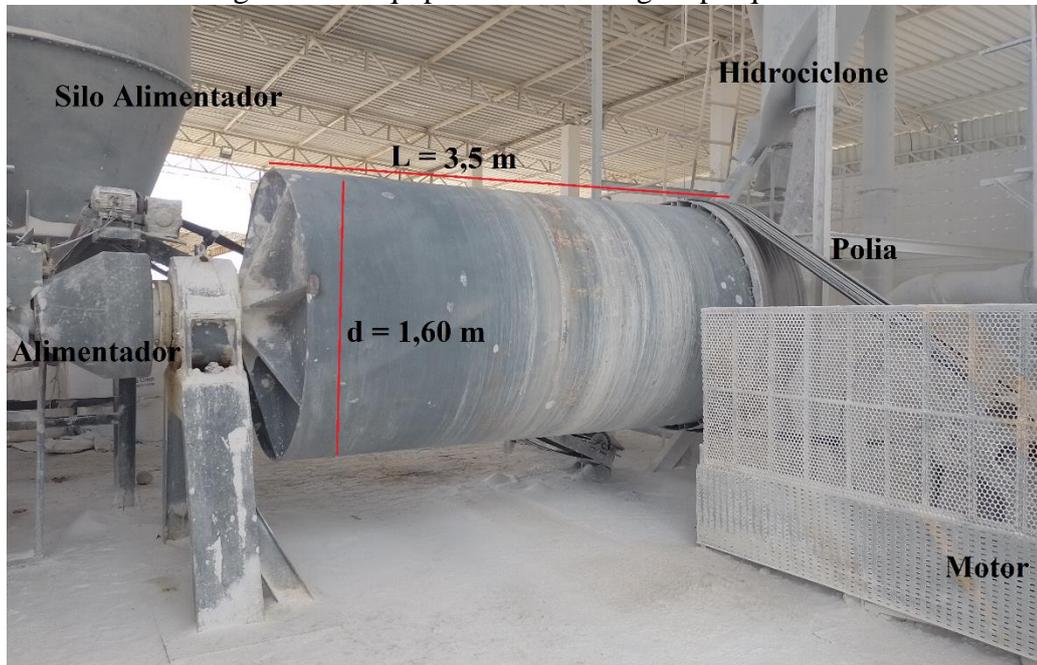
Fonte: Autoria própria (2023)

Quando observamos a Figura 73 e consideramos o dimensionamento matemático realizado, conforme as demandas operacionais, é possível identificar e sugerir as seguintes mudanças:

- Cerca de 87,55% do material que alimenta a peneira apresenta tamanho entre 25 mm e 4,69 mm, e só 10% são menores que 4,69 mm. Após o processo de peneiramento, temos que 69,07% do material está entre 25 mm e 4,69 mm, e 25% são menores que 4,69 mm. Assim, vimos que a distribuição granulométrica do material entre o britador secundário e a peneira está próxima. Nesse caso, é notória a necessidade de melhorias na eficiência do peneiramento.
- Esse equipamento possui dois deques, em que o material retido na primeira tela da peneira apresenta uma granulometria grosseira. Isso acontece em razão da abertura da tela ser de 16,0 mm. O material passante na primeira tela cai sobre a segunda tela de abertura de 3,0 mm, em que o passante é considerado rejeito e o retido é direcionado para a saída, juntando-se ao retido da abertura de 16,0 mm, para alimentar o moinho de seixos.
- Para tornar o equipamento eficiente, inicialmente deve-se usar na alimentação da peneira um material com tamanho de partículas menores. Nesse caso, é importante que 100% do material que saia do britador secundário esteja seja $\leq 10,0$ mm.
- Sendo assim, a peneira da Figura 73 deve possuir uma abertura de 10,0 mm na primeira tela, e de 5,0 mm na segunda tela. Logo, teremos uma faixa de material entre 5,0 mm e 10,0 mm para alimentar o moinho de seixos.

A figura seguinte apresenta o processo de moagem para os minerais de quartzo e feldspato pegmatítico na unidade de beneficiamento estudada. Na Figura 74, observa-se o moinho de seixos com suas dimensões específicas e os equipamentos periféricos.

Figura 74 – Equipamento de moagem pesquisado



Fonte: Autoria própria (2023)

Ao analisar a Figura 74, na qual estão inseridos os dados dos ensaios de moagem e dos cenários da simulação, podemos sugerir para a otimização do processo de moagem, as seguintes modificações:

- O silo alimentador recebe material com granulometria de até 25 mm. O ideal é que o material seja $\leq 10,0$ mm. Também seria importante a instalação de um sensor de nível, para quando o silo atingir a sua capacidade, ocorra uma emissão sonora e pare a alimentação.
- O tamanho das partículas que chegam ao alimentador são consideradas grossas. Para melhorar a eficiência de redução granulométrica do moinho de seixos, é preciso que a alimentação seja fina ($\leq 10,0$ mm).
- O moinho em operação foi instalado sem orientação técnica e apresenta as dimensões de 3,5 m de comprimento e 1,60 m de diâmetro externo. Para o tamanho da alimentação (até 25 mm) atual a relação L/D não é adequada e deveria ser de 0,7 a 1:1.
- Visando à otimização do moinho de seixos da unidade de beneficiamento, no qual as suas dimensões (3,5 m x 1,60 m) estão definidas, fazem-se necessárias alterações nas variáveis operacionais, conforme os ensaios realizados.
- Para a operação do moinho de seixos com as dimensões atuais, recomenda-se: granulometria do material de alimentação $\leq 10,0$ mm, velocidade de operação de 62% da velocidade crítica e

carga de enchimento de 35% (34% de minério e 66% de corpo moedor). Essa configuração permite uma operação com rendimento satisfatório, conforme o processo simulação do cenário I.

- Também é possível um outro arranjo das variáveis para a operação do moinho de seixos com as dimensões atuais. Recomenda-se: granulometria do material de alimentação $\leq 10,0$ mm, velocidade de operação de 62% da velocidade crítica e carga de enchimento de 40% (30% de minério e 70% de corpo moedor). Nesta situação, o processo de simulação do cenário II e os ensaios de moagem II em bancada, mostraram ser os mais eficientes para o processo de moagem.

4.8 PARÂMETROS ÓTIMOS PARA O PROCESSO DE MOAGEM DE PEGMATITOS

Para o processo de cominuição da unidade de beneficiamento estudada, que é representada pelas Figuras 73 e 74, tem-se que para um melhor desempenho do moinho de seixos e maximização da produção de material passante em 0,147 mm, as seguintes recomendações:

- A alimentação do circuito de cominuição deverá apresentar granulométrica menor. É importante que o *Run of Mine* (ROM) tenha no máximo 200 mm (20 cm), para facilitar a acomodação no caixão de alimentação e a entrada do material na boca do britador primário.
- Caso o britador de mandíbulas primário seja alimentado com partículas de no máximo 200 mm, deverá ser ajustado para uma redução granulométrica de 5X1, resultando na boca de descarga do britador um produto de no máximo 40,0 mm.
- Em seguida, o britador de mandíbulas secundário será alimentado com material de tamanho de no máximo 40,0 mm. Nesse caso, a redução granulométrica do britador secundário poderá ser de 4x1, resultando na boca de descarga do britador um produto $\leq 10,0$ mm.
- O material proveniente do britador secundário ($\leq 10,0$ mm) alimentará a peneira vibratória inclinada. Baseado na Metso, poderá ser empregado na operação de peneiramento a Peneira M de referência 20008/1A. Essa peneira apresenta um deck, motor de 4,0 Hp e dimensões de 2000x1800 mm.
- A determinação empírica da energia e a consequente definição das dimensões do moinho para o processo de moagem sugere a utilização de um moinho de seixos de 2,44 m de comprimento e 2,44 m de diâmetro externo, com velocidade de operação de 76,1% da velocidade crítica, carga de enchimento de 40% e potência de motor de 228,0 Hp.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do ensaio de Picnometria a Gás, foram determinados os valores de densidade para as amostras coletadas em pontos distintos do circuito de cominuição. O valor médio de 2,66 g/cm³ obtido entre os dados apresentados dos ensaios está dentro do que se esperava, que é uma densidade de 2,65 g/cm³. A confirmação desse resultado é importante para auxiliar na identificação da amostra. Outro fator interessante é que pode ajudar na escolha de processos de concentração, nos cálculos de volume de minério, e do material da alimentação, rejeito e concentrado de uma usina.

Os resultados obtidos por meio da microscopia eletrônica de varredura corroboram com os resultados obtidos pelos demais métodos de caracterização mineral aqui estudados, apresentando apenas partículas de quartzo, evidenciadas pelas características microestruturais típicas presenciadas nas amostras.

Visando a uma melhor compreensão das características do material pesquisado, foram realizados ensaios de DRX e FRX. Em relação à difração de raios X, foi obtido que a fase mineralógica indicada é do mineral quartzo, pois os picos dos difratogramas das amostras são coincidentes aos característicos do mineral quartzo. Essa informação reforça a ideia de se trabalhar no veio do corpo pegmatítico onde ocorre esse material, e principalmente de reaproveitar o estéril, que poderá ser encaminhado ao processo de cominuição.

A espectrometria de fluorescência de raios X permitiu realizar a análise química das amostras de resíduo de quartzo (alimentação e produto do moinho de seixos), e foram definidos os seguintes teores: SiO₂(92.926%), Al₂O₃(6.318%), SO₃(0.358%), K₂O (0.069%), Fe₂O₃(0.069%) CaO (0.060%); SiO₂(94.748%), Al₂O₃(4.507%), SO₃(0.367%), K₂O (0.322%), CaO (0.055%); SiO₂(96.373%), Al₂O₃(2.975%), SO₃(0.355%), K₂O (0.099%), Fe₂O₃(0.075%) CaO (0.058%), Ta₂O₅(0.036%) e HO₂O₃(0.030%). Esses valores obtidos estão dentro das especificações recomendadas para diversas aplicações industriais (Tabela 2). Esses teores indicam que o resíduo de quartzo pesquisado, que não era beneficiado antes, representa uma matéria-prima de boa qualidade e que deve ser aproveitado, podendo adicionar ganhos significativos.

Esse material que não era extraído na mina agora poderá aumentar as reservas minerais do garimpo. Em relação ao beneficiamento, era considerado sem valor e assim era visto como resíduo, acumulando e poluindo o meio ambiente. Agora já podemos pensar nas possibilidades de redução dos resíduos que impactam o meio ambiente. Também é possível aumentar a produção e obter maiores valores econômicos.

Foram realizados quatro ensaios de moagem em bancada, em que o primeiro (01) ensaio (5,0 mm, 70 rpm e 35%) apresentou uma quantidade de material passante em 0,147 mm de 35%. Esse dado está muito próximo dos valores atuais praticados na unidade de beneficiamento, que é de cerca de 40%. Em princípio, esses parâmetros não representariam uma melhoria no processo de moagem, e sim a manutenção do que já acontece no processo de moagem. O segundo (02) ensaio (5,0 mm, 70 rpm e 45%) ocorre com um aumento na carga de enchimento, de 35% para 40%. Nesse caso, foi apresentado uma quantidade de material passante em 0,147 mm de 48%. Esse resultado significa um aumento de 8% em relação aos dados em escala industrial e também demonstra que, com o aumento da carga de enchimento do moinho de seixos, melhora a eficiência operacional.

O terceiro (03) ensaio (5,0 mm, 100 rpm e 35%), em que ocorre uma mudança da velocidade de rotação, de 70 rpm para 100 rpm, apresentou cerca de 50,71% de material passante em 0,147 mm. Esse resultado é interessante e é maior (40%) do que a escala industrial, significando um crescimento de 10,71% em relação à indústria. Já o quarto (04) ensaio (5,0 mm, 100 rpm e 40%) apresenta cerca de 48,0% de material passante em 0,147 mm, apresentando um crescimento de 8,0% em relação à indústria. Assim, temos que, com a mudança de 70 rpm para 100 rpm na velocidade de operação, a eficiência do moinho diminui com o aumento da carga de enchimento, ao contrário dos resultados para 70 rpm. Nesse caso, ao aumentar a rotação do moinho, faz-se necessário termos uma carga de enchimento menor no processo de moagem. Então, os ensaios apresentam dois caminhos para o ganho de eficiência na moagem, ao aumentar a carga de enchimento, diminuimos a velocidade de operação e, quando aumentamos a velocidade de operação, diminuimos a carga de enchimento.

Foram obtidos cinco cenários de simulação, nos quais indicam que é possível termos ganhos significativos de produção em 0,147 mm (malha 100), com mudanças nas variáveis. O primeiro (01) cenário da simulação apresenta um percentual de material passante em 0,147 mm de 52,18%, que representa um crescimento de 12,18% em relação à atividade operacional da indústria e 17,18% em relação ao ensaio da moagem I. Nesse caso, o cenário I da simulação apresenta um crescimento importante em termos de eficiência do equipamento de moagem, quando utilizadas as variáveis definidas em estudo. O segundo (02) cenário da simulação possui cerca de 57,99% de material passante em 0,147 mm, que representa um crescimento de 17,99% em relação ao processo industrial e 9,99% em relação ao ensaio da moagem II. Esse cenário possibilita um melhoramento no desempenho do moinho de seixos, quando empregados os parâmetros encontrados durante os ensaios.

No que se refere ao terceiro (03) cenário, a quantidade de material passante em 0,147 mm é de 23,62%, mostrando uma diminuição em relação aos 40% da escala industrial, e dos 50,71% do ensaio III da moagem. Nessa situação, quando são usados os dados que foram coletados e ensaiados para o processo de simulação, não teremos uma redução granulométrica boa. Já o cenário quatro (04) apresenta 39,01% de material passante em 0,147 mm. Esse percentual é praticamente o que ocorre na unidade de beneficiamento e é menor que os 50,71% do ensaio da moagem IV. Sendo assim, esse cenário apresenta dados conflitantes com a moagem IV, e consequentemente as variáveis usadas para a simulação não propiciam uma melhor eficiência na moagem.

De forma geral, os trabalhos desenvolvidos (campo, laboratório e simulação) nesta pesquisa permitiram a geração de informações que possibilitam fazer alterações no fluxograma do processo de cominuição da unidade de beneficiamento analisada. Essas informações permitem a otimização do processo de moagem e também a definição de parâmetros ótimos, visando à instalação e à operação de um novo moinho de seixos. No que diz respeito à otimização, é possível realizar ajustes para o peneiramento e o equipamento de moagem. Esses ajustes mostraram-se efetivos para a melhoria na redução granulométrica do material passante em 0,147 mm. Quando pensamos na instalação de um novo empreendimento minerário, voltado para moagem do resíduo de quartzo, temos os dados dos parâmetros ótimos, obtidos dos modelos empíricos e da simulação do processo. Assim, podemos fornecer um fluxograma de um processo de moagem próximo das condições operacionais ideais.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em razão da necessidade de uma mineração sustentável, devem-se realizar os ensaios tecnológicos nos diversos pegmatitos da região, de tal forma que possam quantificar e identificar sua composição mineralógica, direcionando para a aplicação industrial e consequentemente reduzindo a quantidade de resíduos produzidos nos garimpos.

Existe uma quantidade considerada de resíduos no entorno dos garimpos explorados nos pegmatitos existentes na região de Pedra Lavrada-PB, pode-se fazer um planejamento de lavra a céu aberto e também um dimensionamento de uma pequena usina de beneficiamento para ser instalada no próprio garimpo.

Realizar ensaios de moagem em bancada com os resíduos provenientes dos diversos garimpos da região, alterando as variáveis operacionais, como por exemplo, o uso de diferente tipos de corpos moedores, e depois fazer um comparativo.

Realizar o processo de simulação para o circuito de cominuição completo, envolvendo os britadores, peneiras, moinho de seixos e o hidrociclone.

Empregar em outras unidades de beneficiamento de pegmatitos da Província Pegmatítica da Borborema o mesmo procedimento, porém fazendo a simulação em todos os equipamentos.

REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, S. **Projeto quartzo industrial dueré-cristalândia-TO**. Série Rochas e Minerais Industriais, nº 06. Goiânia: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2010. 59 p.
- ADUSUMILLI, M. S. **Contribuição a mineralogia dos nióbio-tantalatos da Província Pegmatítica Nordestina**. 1976. Tese (Livre Docência em Mineralogia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1976. 254 p.
- ALVES, V. K. **Otimização de carga moedora utilizando ferramentas de modelamento matemático e simulação de moagem**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- ARCOVERDE, W. L. **Balanco mineral do quartzo**. Brasil Mineral, nº 54, 1988. p. 24-35.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISSO 3082: minério de ferro – procedimento de amostragem e preparação de amostras**. Rio de Janeiro, 2003.
- BARBATO, G. N.; SAMPAIO, J. A. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. Determinação experimental do índice de trabalho (WI). Rio de Janeiro GETEMIMGT, 2007. cap. 10, p. 179-192.
- BARBOSA, M.I.M.; PORPHÍRIO, N. H. **Caracterização Tecnológica de Lascas de Quartzo**. Série Tecnologia Mineral, CNPq/CETEM, 1995.
- BASU, A. J.; BAAFI, E. Y. **Discrete event simulation of mining systems: current practice in Austrália**. International Journal of Surface Mining, Balkeema, v.13, 1999. p.79-84.
- BAYRAKTAR, I.; ÇAKIR, U. **Quality feldspar production at Çine Akmaden**. Industrial Mineral, n.416, 2002. p. 56-59.
- BERALDO, J. L. **Moagem de minérios em moinhos tubulares**. 1ª edição, São Paulo. 1987. p. 6-7.
- BERGEMAN, M. G. **Modelagem e simulação do circuito de moagem do sossego**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- BERGERMAN, M. G. **Curso de especialização em tratamentos de minérios**. Doc Player. Disponível em <<http://docplayer.com.br/51405966-Curso-de-especializacao-em-tratamento-de-minerios-moinhos-de-bolas-e-barras.html>>. Acesso em: 02 jun. 2021.202, 2012.
- BERGERMAN, N. G. **Dimensionamento e simulação de moinhos verticais**. Tese – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- BOND, F. C., 1952, “**The Third Theory of Comminution**”, Transactions of The AIMME, New York, v. 193, 1952. p. 484-494.
- BORG, R. J.; DIENES, G. J. **The Physical Chemistry of Solids**. Boston: Academic, 1992. 584p.

BOTTER, R.C. **Introdução às técnicas de simulação e ao programa arena**. Apostila do curso do departamento de engenharia naval e oceânica da escola politécnica da universidade de São Paulo, São Paulo. 2001.

BRANCO, P. C. A. **Principais depósitos minerais: conceitos, metodologia e listagem**, In: "Geologia do Brasil", Schobbenhaus, C. ed, Div. Geol e Mineral, ANM, Brasília. 1984. p. 359-416.

BRGM. **Usim Pac: Process simulation and optimization software**. Disponível em <<https://www.brgm.fr/en/software/usim-pac-process-simulation-optimization-software>>. Acesso em 28/12/2022.

BROCHOT, S.; WIEGEL, R.L.; ERSAYIN, S.; TOUZE, S. "**Modeling and simulation of comminution circuits with USIM PAC**", Advances in comminution, Ed. S.K. Kawatra, SME, 2006, pp 495-511.

CARDOSO, J.; FARNES, J.M.; CURY, J.E. **Controle de sistemas de manufatura**. Apostila do Curso de Pós-Graduação em Automação Industrial da Universidade Federal de Santa Catarina e da Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 1994.

CARRISSO, R. C. C. **Aplicação de uma metodologia que simule em moinho de laboratório operações contínuas de moagem com seixos para talco**.1995. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

CARVALHO, R. M. **Desenvolvimento de modelo matemático generalizado da cominuição**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

CASPEO. **Usim Pac: Process modeling and simulation software**. Disponível em <<https://www.caspeo.net/process-modeling-simulation-software-usim-pac/>>. Acesso em: 28/12/2022.

CASPEO. **Usim Pac: Start Guide**. 2006.

CASSEL, R. A. **Desenvolvimento de uma abordagem para divulgação da simulação no setor calçadista gaúcho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

CASTRO, C.; JATOBÁ, L. **Litosfera: Minerais, Rochas e Relevos**. 2. Ed. Recife: Bagaço, 2006.

CECILIANO, W. R. A. **Aplicação de um método de simulação-otimização na cadeia produtiva de minérios de ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte) – Escola de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

CHAVES, A.P.; PERES, A.E.C. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. 2ª edição, São Paulo. 2003. p. 425-563.

CHO, K. **Breakage mechanisms in size reduction**, PhD thesis, Department of Metallurgical Engineering, University of Utah, Salt Lake City, Utah, USA. 1987.

CITIC HEAVY INDUSTRIES. **Moinhos para mineração**. Disponível <<http://citicheavyindustries.com.br/mine-mill.html>> Acesso em 30 de janeiro de 2023.

COELHO, J.M. **Perfil do feldspato** - Ministério de Minas e Energia – Recife, PE. 2009.

CONSTANTETINE, W. **Quartzo: purificação deve começar na mina**. Dirigente construtor, 21(6): 27-37, 1985.

CORREA, M. **Variedades gemológicas de quartzo na Bahia, geologia, mineralogia, causas de cor, e técnicas de tratamento**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. p. 29.

DA SILVA, M. R. R.; DANTAS, J. R. A. **A Província Pegmatítica da Borborema-Seridó nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte**. In: **Principais Depósitos Minerais do Nordeste Oriental** - Série Geologia. Nº 04. DNPM, Brasília. 1984.

DEER, W. A.; HOWIER R. A.; ZUSSMAN J. **Minerais constituintes das rochas: Uma Introdução**. Tradução. Ed. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa. 1966. 547 p.

DIANA, F.R. **Pedras Brasileiras**. Ed. Reler, Rio de Janeiro, 2004. 124 p.

DONDA, J. D. Estudo do comportamento de um itabirito do Quadrilátero Ferrífero quanto à superfície. 1998. Dissertação – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

DURANCE, M. V., GUILLANEU, J. C., VILLENEUVE, F. G., BROCHOT, S. **Usim Pac 2 for windows: Advanced Simulation of Mineral Processes**, Balkema. 1994.

ERGUN, L., EKMEKCI, Z., GULSOY, O. and BENZER, H. **Modelling and simulation of grinding circuit in manauli copper concentrator**, *Physiochemical Problems of Mineral Processing*, 2004, p.38-231.

EW-EURODRIVE PORTUGAL. Soluções completas com as coroas dentadas segmentadas. Disponível <https://www.sew-eurodrive.pt/solucoes/solucoes_com_redutores_industriais/moer_quebrar_e_triturar/forno_rotativo/forno_rotativo.html> Acesso em 30 de janeiro de 2023.

FERNANDES, J. A. A. P. **Potencialidades dos depósitos pegmatíticos de quartzo e de feldspato em Portugal**. Tese (Doutorado), Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro, Portugal, 2006.

FERSMAN, A.E. **Les pegmatites, leur importance scientifique et pratique**. *Academy of Science of URSS* (Traduzido para o francês por R. du Trien de Terdonck e J.Thoureau, Universidade de Louvain, Bélgica). vol 3. 1931. 675 p.

FOGGIATTO, B. **Previsão de desempenho do circuito de moagem de Carajás**. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo-USP, 2009. 232p.

FORRESTER, J.W. **World dynamics**. Cambridge: Wright-Allen Press, 1971.

FREITAS FILHO, P.J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas**. Florianópolis: Visual Books, 2001.

FRONDEL, C. **The system of mineralogy – sílica minerals**. New York: J. Wiley and Sons Inc., 7.ed., 1962.

FURLAN. **Moinhos de bolas**. Disponível <https://pampeiro.com.py/pt-br/download/britagem_e_trituracao/moinhos_bolas_barras.pdf> Acesso em 27 de janeiro de 2023.

GOMES, A. C.; VECHI, C. A. **Estática romântica: Textos doutrinários cementados**. Tradução Maria Antônia Simões Nunes, Duílio Colombini. São Paulo: Atlas, 1992, 186p.

GOTZE, J; MOCKEL, R. **Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics**. Alemanha: Springer, 2012. 366 p.

GRAÇA, L.M.; LAGOEIRO, L.E.; LIMA, R.M.F.; BARBOSA, P.F.; MACHADO, M.M. **Effect of the morphological types in grinding of iron-ore products**. Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review, n.36, 2015.

HERBST, J. A.; FUERSTENAU, D. W. “**Scale-up Procedure for Continuous Grinding Mill Design Using Population Balance Models**”, International Journal of Mineral Processing, v.7. 1980. p. 1-31.

HOLLOCKS, B. A. **Well-kept secret? Simulation in manufacturing industry reviewed**. Or insight, Warrick, v.5, p.12-17.1992.

HUKKI, R. T. “**Minerals Beneficiation: Proposal for a Solomonic Settlement between the Theories of von Rittinger, Kick and Bond**”, AIME Transactions, New York, v. 220, 1961. p. 403-408.

IDEMA. **Perfil do Estado do Rio Grande do Norte. Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte**. Natal: Secretaria de Estado do Planejamento e das Finanças do Rio Grande do Norte, 2010.

JAMSA-JOUNELA, S.L.; DIETRICH, M.; HALMEVAARA, K. and TIILI, O. **Control of pulp levels in flotation cells**, Control Engineering Practice, 2003, p.11-73.

JOHNSTON Jr., W. D. **Pegmatitos ambligonita-berilo-tantalíferos do Ceará, Nordeste do Brasil**. Rio de Janeiro: DNPM/ Divisão de Fomento da Produção Mineral, 1945.

KICK, F. **Das Gesetz der Proportionalem Widerstand und Seine Anwendung**. Leipzig, 1885. Apud Bond, 1983.

KING, R. P. **Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems**. Editors Butterworth-Heinemann. 2001.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de Ciência dos Minerais**, 23a ed. Bookman, 2012.

KNIGHTS, P. F.; BONATES, E. J. L. **Applications of discrete mine simulation modeling in South América.** International Journal of Surface Mining, [S.I] v.13, p.69-72, 1999.

KOGEL, J. E.; et al. **Industrial mineral and rocks: commodities, markets and uses.** 7ª edição. Colorado, USA: SME - Society For Mining, Metallurgy, And Exploration, 2006. 1565 p.

KRBETSCHEK, M. R.; GOTZE, J.; DIETRICH, A.; TRAUTMANN, T. **Spectral information from minerals relevant for luminescence dating.** Radiation Measurements, v.27, n. 5/6, 1997. p. 695-748.

LAW, A. M.; MCCOMAS, M. G. **How to select simulation software for manufacturing applications.** Industrial Engineering, New York, v.24, n° 7, p. 29-35, jul.1992.

LAW, A.M.; KELTON, W. D. **Simulation modeling e analysis.** 3 ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

LIU, Y.; SPENCER, S. **Dynamic simulation of grinding circuits,** Minerals Engineering, 2004, p.17-1189.

LUZ, A. B. *et al.* **Tratamento de Minérios.** Rio de Janeiro, CETEM/CNPq, 1998.

LUZ, A. B.; COELHO, J. M. **Rochas e Minerais industriais.** CETEM. Rio de Janeiro, 2005. p. 413- 429.

LUZ, A. B.; LINS F. F.; PIQUET B.; COSTA M. J.; COELHO J. M. 2002. **Pegmatitos do Nordeste – Diagnóstico sobre o Aproveitamento Racional e Integrado.** CETEM, Rio de Janeiro, 2002. 49 p.

LUZ, A.B.; BRAZ, E. **Quartzo.** Série Rochas e Minerais Industriais 2. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, RJ, 2000. 22 p.

LUZ, A.B.; LINS, F.A.F. **Rochas e Minerais industriais.** CETEM/MCT, Rio de Janeiro, RJ. 2ª edição, 2008. P. 681- 714.

LUZ, A.B.; LINS, F.A.F. **Rochas e Minerais industriais.** CETEM/MCT, Rio de Janeiro, RJ. 2ª edição, 2008. 990 p.

LUZ, A.B.; LINS, F.A.F. **Pegmatitos do Nordeste: Diagnósticos sobre o Aproveitamento Racional e Integrado.** CETEM/MCT, Rio de Janeiro, RJ. 2003.

LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A. **Tratamento de Minérios,** CETEM/MCTI, Rio de Janeiro, RJ. 5ª edição, 2010. 960 p.

LYNCH, A. J.; NAPIER-MUNN, T. J.; MORRISON, R. D. Simulation in Mineral Processing – The Present and the Future. In: **III Encontro do Hemisfério Sul sobre Tecnologia Mineral e XV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia.** São Lourenço-MG, Parte A – v. 2, 1992. pp. 492-508.

MAGALHÃES, S. A. F. **Modelagem, simulação e controle de densidade de polpa em espessadores.** Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e

Automação de Processos de Mineração) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto-UFOP, Ouro Preto-MG, 2019.

MAN, Y. T. **Model-Based procedure for scale-up of wet, overflow ball mills**. Part I. Outline of the methodology. Minerals Engineering, Oxford, 2001a. v. 14, n. 10, p. 1237-1246.

MAN, Y. T. **Model-Based procedure for scale-up of wet, overflow ball mills**. Part II. Worked example. Minerals Engineering, Oxford, 2001b. v. 14, n. 10, p. 1247-1257.

MAN, Y. T. **Model-Based procedure for scale-up of wet, overflow ball mills**. Part III. Validation and discussion. Minerals Engineering, Oxford, 2001b. v. 14, n. 10, p. 1247-1257.

MANTILLA, E. R., SILVA, F. T. **Sistema Especialista para Controle de Processo na Flotação Mecânica da Samarco Mineração S. A.**, In: 17º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, ABM, Salvador. 2007.

MARQUES, P. S. G. **Caracterização e purificação de quartzo para indústria fotovoltaica**. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

MARTINS, M. A. S. **Simulação e otimização de Processos Mineraiis no Brasil**. In: WORKSHOP “Mining Best Performance”, Instituto Brasileiro de Mineração-IBRAM, Belo Horizonte. 1997.

MATEUS, S.C.A. **Caracterização de quartzos de origem pegmatítica para utilização industrial**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geomateriais e Recursos Geológicos, Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Portugal, 2008.

METSO. **Manual de Britagem**. 6ª Edição. 2005.

MISHRA, B. K.; RAJAMANI, R. K. 1992, “**The Discrete Element Method for The Simulation of Ball Mills**”, Applied Mathematical Modelling, v. 16, 1992. p. 598-604.

MME - **Ministério de Minas e Energia. Perfil do Quartzo. Relatório Técnico 37**. Disponível em <http://antigo.mme.gov.br/documents/36108/448620/P27_RT37_Perfil_do_Quartzo.pdf/50cd24f2-6f8d-44d3-59cb-91d3e509af72?version=1.0> Acesso em: 07/04/2022.

MORRELL, S. **Power draw of wet tumbling mills and its relationship to charge dynamics - Part 1: a continuum approach to mathematical modeling of mill power draw**. Trans inst Min Metall, January-April, 1996a.

MORRELL, S. **Power draw of wet tumbling mills and its relationship to charge dynamics - Part 2: an empirical approach to modeling of mill power draw**. Trans inst Min Metall, January-April, 1996b.

MORRELL, S.; MAN, Y. T. **Using modeling and Simulation for the design of full scale ball mill circuits**. Minerals Engineering, Oxford, 1997. V. 10, n. 12, p. 1311-1327.

MORRELL, S.; STERNS. U. J.; WELLER, K. R. **The application of population balance models to very fine grinding in tower mills.** XIX Int Min Proc Congress (AusIMM). Sydney, 1993. p. 61-66.

MOURA, O. J. M. **Programa Pegmatitos.** Metamig, Belo Horizonte, 1981. 95 p.

NAPIER-MUNN, T. J. et al. **Mineral comminution circuits: their operation and optimization.** Indoorroopilly: Julius kruttschnitt Mineral Research Centre/University of Queensland, 1996. 413 p.

NAPIER-MUNN, T.J et al. **Mineral comminution circuits: their operation and optimization.** JKMRC, 2005. 26.

NOGUEIRA, R. E. F. Q.; Mello, J. D. B. **Abrasão do quartzo: Um estudo esclerométrico.** Anais do 8º Colcimat, Campinas-SP.1988. pp. 451-456.

OLIVEIRA, F. A. N. **Caracterização tecnológica do feldspato potássico e estudo do processo de piroexpansão de feldspatos.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. 67 p.

OLIVEIRA, T. S. **Refino de silício por solidificação por solidificação direcional.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

OUTOTEC. **Revestimento de Moinhos de bolas.** Disponível <<https://www.mogroup.com/products-and-services/parts/mill-liners/>> Acesso em 30 janeiro de 2023.

PANAGIOTOU, G. N. **Discrete mine system simulation in Europe.** International Journal of Surface Mining, [S.I] v.13, p.69-72, 1999.

PEGDEN, C. D. et al. **Introducion to simulation using siman.** 2º ed. New York: McGraw-Hill, 1995.

PIDD, M. **Computer simulation in management science.** 4º ed. New York: John Wiley, 1998.

POSSA, M. V. **Estudos da Modelagem Matemática da Moagem com Seixos para Talco de Diversas procedências.** Dissertação de Mestrado. São Paulo, USP, 1995.

PRADO, D. S. do. **Usando o Arena em simulação.** Série Pesquisa Operacional. Vol. 3 INDG. 2010.

PRADO, D. S. **Teoria das filas e das simulação.** 2º ed. Belo Horizonte. 1999.

RAJAMANI, R. K. **Mathematical Modeling of Extractive Metallurgical Processes,** Notas de Aula, University of Utah. 1992.

RAMKRISHNA, D. **Population Balances: Theory and Applications to Particulate Systems in Engineering.** Editors Academic Press. 2000.

RAMKRISHNA, D., BORWANKER, J. D. “**A Puristic Analysis of Population Balance**”, Chemical Engineering Science, v. 28, 1973. p. 1423-1435.

ROWLAND, C.A. **Diameter factors affecting ball mill scale-up**. International Journal of Mineral Processing, v. 22, 1998.

SALIBY, E. **Repensando a simulação: a amostragem descritiva**. São Paulo: Atlas, 1989.

SANTOS, M. F. M. **Avaliação de jazidas brasileiras de quartzo mais adequadas para uso em sílica vítrea**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Materiais, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

SANTOS, W. K. **Rotas de processo para concentração de minérios itabiríticos e hematíticos da Mina de Fábrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, Belo Horizonte/MG, 2009.

SASTRY, K. V. S. **Principles and Methodology of Mineral Process Modeling**, Berkeley: University of California. 1990.

SCORZA, E.P. **Província Pegmatítica da Borborema**. DNPM/DGM (Boletim 112). Rio de Janeiro, 1944. 55 p.

SHANNON, R.E. **Systems simulation: the art and science**. New Jersey: Prentice-Hall, 1975.

SILVA E. F. A. DA.; CUNHA J. C.; MARINHO M. M. **Pegmatitos da região de Itambé, Bahia: geologia e potencialidade econômica**. (Série Arquivos Abertos; 10). Salvador: CBPM. 1996. 30 p.

SILVA, F.A.N.G.; et. al. **Estudos de caracterização tecnológica e beneficiamento do caulim da região borborema-seridó (RN)**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.

SOARES, D. R. **Contribuição a petrologias de pegmatitos mineralizados em elementos raros e elbaítas gamológicas da Província Pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil**. Tese de Doutorado, UFPE, Recife, 2004. 201 p.

SOLODOV, N. A. **Internal structure and geochemistry of rare- element granitic pegmatites**. Moscow: Academy of Sciences of the USSR, Moscow, 1962. 243 p.

STURGUL, J. R.; LI, Z. **New developments in simulation technology and applications in the minerals industry**. International Journal of Surface Mining, [S,I] v.11, p. 159-162, 1997.

SZYMANKIEWCI, J.; MCDONAL, J.; TURNER, K. **Solving business problems by simulation**. London: McGraw-Hill Publishing Co. 1998.

TAVARES S. T. P.; CASTAÑEDA C.; PEDROSA SOARES A. C. **A importância da caracterização química e mineralógica do feldspato para a sua utilização na indústria cerâmica e vidreira**. Cerâmica Industrial, 10 (4), 2005. p 22-27.

TAVARES, L. M. **Microscale investigation of particle breakage applied to the study of thermal and mechanical predamage**, Ph. D. Thesis, University of Utah. 1997.

TRIVELATO, G. C. **Técnicas de modelagem e simulação de sistemas dinâmicos**. INPE, São José dos Campos, 2003.

VIDAL, F.; NOGUEIRA NETO, J. A. **Minerais de pegmatitos**. Rochas e Minerais Industriais do Estado do Ceará. Rio de Janeiro-RJ. 2005. p 67-81.

Von RITTINGER, P. R. **Lehrbuch der aufbereitungskunde**. Berlin, 1867. Apud Bond, 1983.
WAN, K. W. Feldspar's fallow future. **Industrial minerals**, London, 2008. p 52-59.

WENK, H. R. **Preferred orientation patterns in deformed quartzites**. In: Reviews in Mineralogy. Editores: P. J. Heaney, C. T. Prewitt e G. V. Gibbs. Mineralogical Society of América, 1994. vol. 29, p. 177-208.

WILLS, B. A.; NAPPIER MUNN, T. J. **Mineral processing technology**. 2006.